

وزارة التعليم العالي
جامعة البعث
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

تأثير عوامل انتفاخ التربة على عامل نفاذيتها

بحث علمي أعد لنيل درجة الماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية

إعداد المهندسة
لينا محي الدين ابراهيم

إشراف

الأستاذ الدكتور عامر فاخوري
مشرفاً أساسياً

الأستاذ الدكتور عيسى كوسى
مشرفاً مشاركاً

2011



تأثير عوامل انتفاخ التربة على عامل نفاذيتها

ملخص البحث

- يتناول البحث العوامل المؤثرة على نفاذية الترب الانتفاخية حيث يعد عامل النفاذية المعيار الرئيسي لمعرفة مدى صلاحية التربة كمادة بناء في السدود الترابية والحواجز الكتيمة وغيرها من المنشآت. الأمر الذي يتطلب إجراء تجارب النفاذية التي تستغرق وقتاً طويلاً نسبياً وتحتاج الكثير من الدقة والمراقبة لهذا السبب كان هدفنا إيجاد علاقات تجريبية تربط قيمة عامل النفاذية بعوامل الانتفاخ لا سيما ضغط انتفاخ التربة كمتحول رئيسي للتعبير عن انتفاخية التربة الغضارية.
- لهذه الغاية تمت دراسة ثلاثة أنواع من الترب الغضارية المتفاوتة في قابليتها للانتفاخ وفي حالتي الانتفاخ وتطويق الانتفاخ الشاقولي للتربة بهدف إيجاد العلاقة بين ضغط الانتفاخ وعامل نفاذية التربة.
- تضمن البحث قسماً نظرياً مؤلفاً من ثلاثة فصول: تضمن الفصل الأول مقدمة عامة عن الترب الغضارية وأهمية البحث والغاية من الدراسة، في حين استعرض الفصل الثاني خواص الترب الانتفاخية وتأثير الماء عليها والعوامل المؤثرة على السلوك الانتفاخي للترب الغضارية وتعريف ضغط الانتفاخ وطرق حسابه، وتم تخصيص الفصل الثالث لدراسة هيدروليك التربة وجريان الماء فيها حيث تم استعراض العوامل المؤثرة على عامل نفاذية التربة وطرق حسابه مخبرياً وحقلياً.
- تناول الفصل الرابع مخطط العمل التجريبي حيث تم عرض التجهيزات المستخدمة في التجارب وتوصيف الترب المدروسة وعرض النتائج التي تم الحصول عليها من تجارب التشديد والنفاذية، كما تضمن دراسة حقلية لسد الشهيد باسل الأسد في سوريا ومقارنة النتائج الحقلية للنفاذية مع نتائج تجارب تطويق الانتفاخ الشاقولي للترب المدروسة.
- أخيراً تم إجراء تحليل رياضي للنتائج وصياغة علاقات رياضية تربط قيمة عامل النفاذية بضغط انتفاخ التربة المدروسة كما تم التوصل إلى بعض التوصيات الخاصة باختيار تربة النواة الغضارية للسد الترابي.



Influence of Soil Swelling Factors on its Permeability Coefficient

Abstract

- This research discusses the affecting factors on the permeability of the expansive soils. The permeability coefficient is the principal norm to definite the suitability of the soil as a building material in the soil dams and embankments, etc. This object needs execution permeability experience which needs a long time and a lot of accuracy, so for this reason our aim was invention experience relationships between the permeability coefficient and the swelling factors especially the swelling pressure as a principal parameter of the expansive soils, these experience relationships help to estimate the permeability coefficient without execution permeability experiences.

- This research includes studying of three types of clayey soils which are different in its swelling behavior. We performed two series of tests: the first series in the case of swelling at various water content to conclude experience relationships between the permeability coefficient and the swelling pressure, the second series in the case of investment the vertical swelling of the soil.

- The research includes theoretical part consisted of three chapters: First chapter showed introduction about swelling soils, the importance and the aim of the research. Second chapter introduces swelling soils properties and influence of water on it, expansive pressure, method of its calculation, and influencing factors on swelling behavior. The third chapter provided general information about the hydraulic of the soil and flow water, influencing factors on permeability coefficient, field and laboratory method of its calculation.

- Fourth chapter showed the experience work design, devices used to investment the vertical swelling of the soil, the results which obtained from the consolidation and permeability experiences, in addition to field study to Al Shahied Bassel Alassad dam in Syria and comparison the field permeability results with the experience results which obtained from the investment the vertical swelling experiences of the soil.

- Finally, we presented all tests results and the final research conclusions, where the most important results was some special conclusions for selection the clayey core soil.



الفهرس


created with
nitro PDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional


created with
nitro PDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional


created with
nitro PDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional

فهرس الأشكال والمنحنيات

الصفحة


created with
nitro PDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional


created with
nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional



created with
nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional

الفصل الأول ...

!!

دراسة مرجعية

مقدمة عامة عن الترب الانتفاخية



1- 1- ! ! !أ !!!!

تتميز الترب الانتفاخية بقابليتها الكبيرة للتغيرات الحجمية، وتشمل هذه التغيرات الانتفاخ (زيادة حجم كتلة التربة) عند ارتفاع رطوبة التربة والتقلص (تناقص حجم كتلة التربة) عند انخفاضها.

إن المشكلة الرئيسية التي ترافق ظهور الترب الانتفاخية تكمن في أن تشوهاتها أكبر بكثير من التشوهات المرنة وبالتالي لا يمكن التنبؤ بها من خلال نظريات المرونة أو اللدونة التقليدية. كما تتسم حركة سطح الأرض بعدم الانتظام وتصل تشوهاتها إلى حد كبير يسبب أضراراً بالغة للمنشآت والأرصفة المقامة عليها، حيث تقدر كلفة إصلاح وترميم المنشآت المتضررة بتأثير انتفاخ التربة بمئات الملايين من! الدولارات سنوياً في مختلف أنحاء العالم [17].

لقد شكلت الترب الغضارية مشاكل عديدة للمنشآت ذات الأحمال الخفيفة والمستندة إليها وذلك نتيجة لتشددها تحت تأثير الأحمال من جهة وتغيراتها الحجمية التابعة لتغير رطوبتها باستمرار من جهة أخرى. والنتيجة حدوث تشوهات كبيرة وحركات تفاضلية تتسبب في تضرر الأساسات والعناصر الإنشائية والناحية الجمالية المعمارية للمنشأة. وفي كثير من الحالات تصبح المنشآت خارجة عن الاستثمار أو غير قابلة للسكن بالرغم من الجهود المبذولة لتحسين الترب الغضارية حيث أن عدم استخدام التحسينات الملائمة قد يسبب حدوث خسائر كبيرة تصل إلى بلايين الدولارات سنوياً [19].

وقد تسببت هذه الترب في الولايات المتحدة الأمريكية بظهور العديد من التصدعات والتشققات في المباني وكذلك حدوث ارتفاعات ونتوءات كبيرة في الأرصفة والطرق المقامة عليها وكانت هذه التشوهات خفيفة أو متوسطة أو كبيرة حسب مقدار الانتفاخ، حيث قدرت الخسائر الناجمة عن الترب القابلة للانتفاخ بحوالي ستة إلى عشرة ملايين دولار سنوياً لصيانة الطرق في ولاية تكساس فقط [9].

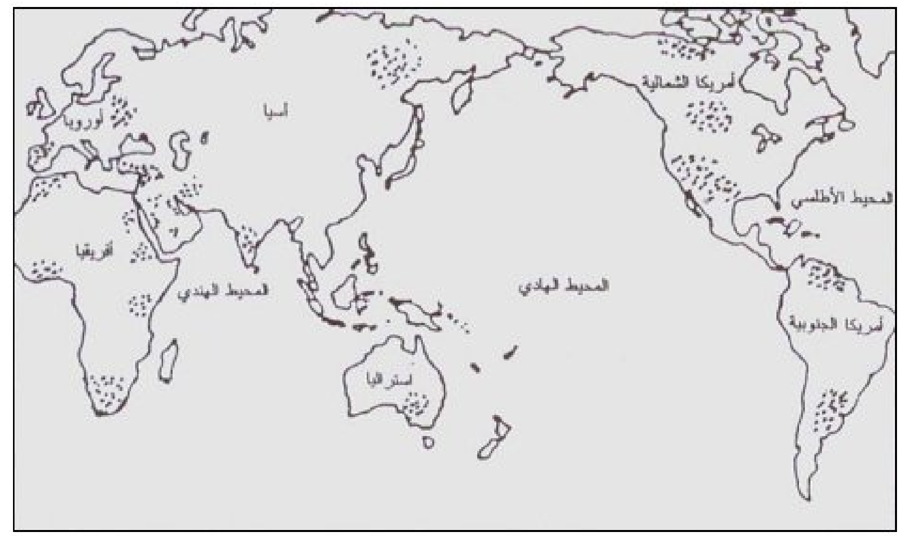
أما على المستوى المحلي فلا توجد حتى الآن أرقام دقيقة تبين مدى الأضرار الناتجة عن انتفاخ التربة بسبب قلة المعلومات المتوفرة لتقدير هذه الأضرار.

ويعرّف الغضار بأنه ذرات مجهرية ناتجة عن التحلل الكيميائي لمركبات الصخور زيادةً على التفتت الميكانيكي وبالتالي فإن جزيئات التربة لا يبقى لها التركيب البلوري المتوفر نفسه للصخر الأم وأبعاد! الجزيئات الناتجة تكون أقل من! **(2 µ)**!!وتتميز جزيئات الغضار بما يلي [10]:

- أبعاد صغيرة جداً (قطر وسطي أقل من **1 µ**).
- شكل مسطح (وريقات أو تطبقات).
- قشرة أو قوقعة من الماء المدمص حول الجزيئات.
- قوى تجاذب مهمة ذات طبيعة فيزيوكيميائية بين الجزيئات.

1- 2- توزع الترب الانتفاخية في العالم:

تتواجد الترب المنتفخة في معظم مناطق اليابسة لكن الظروف المحيطة قد لا تسمح بظهور سلوكيتها، وبمعنى آخر توجد مناطق دائمة الرطوبة تقريباً (استقرار في الرطوبة) وبالتالي لا يسمح بظهور الانتفاخ، مثلاً في بعض الدول الأوروبية تتواجد غضاريات يتجاوز حد سيولتها **(200 %)** أي قابلية الانتفاخ فيها كبيرة لكن استقرار الرطوبة لا يسمح للانتفاخ بالظهور، في حين أنه في مناطق أخرى يوجد رطوبة في فصل الشتاء ثم جفاف لفترة أربعة أو خمسة أشهر تقريباً خلال فصل الصيف مما يسمح بظهور سلوكية الانتفاخ - التقلص [17].



مناطق توزع الترب الانتفاخية في العالم

!>9@!deŒ!!! ƒ œ!!! Œ ! !!Œ! ! ! !!1! 1!!¾! !Œ

وتغطي التربة الانتفاخية حوالي **(3.16)** مليون كيلو متر مربع وهو ما يعادل **(% 2.42)** من اليابسة، وقد يبدو هذا الرقم صغيراً إذا نظرنا إليه من وجهة نظر المساحة الإجمالية لليابسة ولكن بمطابقة مناطق توزع الترب الانتفاخية مع المناطق المأهولة بالسكان فإن النسبة تتضخم بشكل كبير، ونذكر مثلاً أن هذه التربة تغطي حوالي **(% 30)** من المساحة المأهولة في الهند وتسمى بتربة القطن، كما تغطي مناطق شاسعة من فيتنام وأستراليا والسودان ومصر (حيث تنتشر بشكل خاص بمحاذاة الأنهار والبحيرات) والمملكة العربية السعودية وأثيوبيا وجمهورية جنوب أفريقيا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية والجمهوريات الجنوبية من الاتحاد السوفيتي سابقاً، مما يجعل من دراستها موضوعاً على درجة عالية من الأهمية [17].

1- 3- توزع الترب الانتفاخية في سوريا:

تغطي هذه التربة **Km^2 (19525)** تقريباً وهو ما يعادل حوالي **(% 10.54)** من مساحة الجمهورية العربية السورية. تتوزع هذه الترب بكثافة في كل من محافظات حماة، السويداء، درعا، القنيطرة، القامشلي، لواء إسكندرون، كما تتواجد في حمص واللاذقية ودير الزور وفي مواقع أخرى متفرقة ضمن سوريا [17].

1- 4- اهتمام الباحثين بدراسة الترب الانتفاخية:

لقد بقي سلوك التربة الانتفاخية جانباً غامضاً في مجال ميكانيك التربة لمدة طويلة ولا تزال الأبحاث العلمية حتى يومنا هذا قاصرة عن تفسير نواحي كثيرة في مجال سلوكية هذه الترب وتحديد خصائصها والعوامل المسيطرة على السلوك الانتفاخي - التقلصي لها، حيث لم يتم التعرف على مشاكل الترب القابلة للانتفاخ حتى عام **1930** وفي عام **1938** اعتبرت التربة الانتفاخية السبب الرئيسي لانهيار أساسات أحد المباني في ولاية أوريجون في الولايات المتحدة الأمريكية، عندها بدأ اهتمام الباحثين وعلماء الجيوتكنيك ينصب على دراسة سلوكية وخصائص هذه الترب، ونعرض فيما يلي موجزاً تاريخياً لتطور أبحاث الترب الانتفاخية [19]:

- بدأ اهتمام الباحثين بسلوك الترب الغضارية يظهر بوضوح منذ حوالي ثمانين سنة من عمر الثقافة الجيوتكنيكية، ففي عام **1932** وضع الباحث **(Arthur Casagrande)** واحداً من أوائل الأبحاث التي! تناولت بنية الغضار وآثاره على هندسة الأساسات، وفي نفس العام نشر **(Simpson)** مقالة حول التجارب المستخلصة من التأسيس على الترب الغضارية في الولايات المتحدة الأمريكية.



- نشر الباحث **(Grim)** عام **1953** كتاباً عن التركيب الفلزي للترب الناعمة، كما ركز الباحث **(Skempton)** أبحاثه حول النشاط الانتفاخي للغضاريات وهو ما يعرف بفعالية الغضار.
- في عام **1957** بيّن الباحثان **(Jennings & Knight)** طريقة تحديد مقدار انتفاخ الغضار بالاعتماد على نتائج تجربة الآدومتر وحيد الاتجاه، ومع نهاية الخمسينات نشر **(McDowell)** مقالة عن تصميم المنشآت الخفيفة على الترب الانتفاخية ومنها تم التوصل إلى طريقة **(Texas)** لتصميم الرصف وهي ما تزال مستخدمة حتى وقتنا هذا.
- شهد عقد الستينات زيادة ملحوظة في الأبحاث والتجارب على الترب الغضارية المنتفخة وتم تحقيق خطوات واسعة لفهم سلوك الترب الغضارية، ففي عام **1960** طوّر **(Lambe)** طريقة لتقدير إمكانية انتفاخ الغضار بواسطة جهاز الانتفاخ الشاقولي **(PVR)**، وفي عام **1962** ناقش **(Seed)** خواص الانتفاخ للغضاريات المرصوصة، كما نشر قسم الطرق في جامعة كولورادو عام **1964** مراجعة شاملة للخبرات الموجودة في حينها في مجال الترب الانتفاخية، وقد شكل تقرير اللجنة الاستشارية لأبحاث البناء **(BRAB - 1968)** حجر الزاوية في تصميم الحصائر الجائزية على الترب الانتفاخية وقد احتوى هذا التقرير على أول معيار تصميمي يتم قبوله من شريحة واسعة من العاملين في مجال تصميم الأساسات ذات التحميل الخفيف والمستندة إلى غضاريات منتفخة، ولا يزال هذا المعيار مرجعاً موثوقاً حتى يومنا هذا.
- أما عقد السبعينات فقد فتح أبواباً جديدة في مجال تصميم الأساسات ذات التحميل الخفيف والمستندة إلى تربة انتفاخية، كما ظهر مفهوم امتصاصية التربة أو ما يعرف بضغط ماء المسام السالب الناتج عن شراهة الغضار للرطوبة وذلك لتعديل مستويات الطاقة الفيزيائية - الكيميائية في التربة. كذلك فقد تم تطوير العديد من الطرق والتجارب المخبرية لقياس امتصاصية التربة من قبل الباحثين **(Johnson 1973-1977, Snethen 1979-1984, Mckeen 1980-1981)**، وبدأ بعض الباحثين العمل على تشكيل نماذج للتنبؤ بسلوكية الترب الانتفاخية، وفي عام **(1976)** نشر الباحث **(Mitchell)** كتابه المتميز الذي احتوى معالجة واضحة لسلوكية التربة الانتفاخية.
- تتالت الندوات والمؤتمرات حول الترب الغضارية الانتفاخية، ونذكر منها: ندوتان في جامعة **Texas** عامي **1965** و **1969**، ندوة في معهد التكنولوجيا التقني في حيفا في فلسطين المحتلة **1973**، ندوة دنفر **Denver, 1980**، ندوة في أستراليا عام **Australia, 1984**، ندوة في نيودلهي **Newdlhi, 1987**، ثم عقد المؤتمر الدولي حول الترب الانتفاخية في دالاس **Dallas, 1992**، مما ساهم في الانتقال من المفهوم المجرد للترب الانتفاخية إلى مفهوم استيعاب سلوك الترب المشبعة جزئياً.
- في بداية الثمانينات عقد مؤتمر جامعة **Colorado** بإشراف الباحثين **(Nelson & Miller)** وتم نشر أول دليل عمل حول تصميم البلاطات مسبقة الإجهاد والمستندة إلى تربة انتفاخية. بعد ذلك صدرت معظم الأبحاث التي اهتمت بهذا الموضوع باسم الترب غير المشبعة وسلوكها وأكثر هذه الأبحاث اكتمالاً كتاب **(Fredlund, 1993)**.
- نشر الباحث **Petry** بين عامي **1996 - 1992** أبحاثاً حول آثار الإجهاد الأولي على الانتفاخ المقاس لاحقاً، كما نشر **(Ridley & Wray)** عام **1996** مراجعة عن النظريات الحالية والخبرات العملية في مجال قياس امتصاصية التربة.
- قدم الباحث **Lytton** ثلاثة أبحاث هامة: جريان الماء في الترب الغضارية **1994**، الرصف والأساسات على الترب غير المشبعة **1995**، تصميم المنشآت الهندسية على الترب الانتفاخية **1997**، كما ناقشت أعماله أيضاً الآثار التخريبية للترب المنتفخة.

ومع بداية الألفية الحالية أصبح لدى المهندسين الجيوتكنيكيين قاعدة معلومات جيدة حول الترب الانتفاخية وبات أمراً حتمياً على الجيوتكنيكيين المعاصرين أن يسلحوا أنفسهم بمعرفة طرق معالجة مشاكل الترب الانتفاخية، وعلى الرغم من التطور الجوهري الملحوظ في مجال التعريف بسلوك الغضاريات الانتفاخية أ... التأسيس عليها، إلا أن الأساليب العملية في مجال الهندسة الجيوتكنيكية والطرق

المخبرية لتوصيف هذه الترب ودراسة سلوكها الانتفاخي لم تتطور بنفس المقدار. وهذا ما يؤكد على أهمية استمرار ومتابعة الأبحاث لتحسين فهمنا لسلوك الترب الانتفاخية.

!!

1- 5- أهمية البحث:

إن دراسة تأثير عوامل انتفاخ التربة على عامل نفاذيتها مسألة هندسية ذات أهمية كبيرة بالنسبة للمهندسين الجيوتكنيكيين في قطرنا نظراً لانتشار الترب الغضارية على مساحات واسعة من سوريا وبالتالي استخدام هذه الترب بشكل كبير كقواعد لأساسات المنشآت الهندسية وكمادة بناء في السدود الترابية والحواجز الكتيمة، حيث يعد معامل النفاذية المعيار الرئيسي لمعرفة مدى صلاحية التربة كمادة بناء لهذه المنشآت.

ونظراً لنقص الأبحاث والدراسات العلمية التي تغطي هذا الموضوع حيث اقتصرت معظم الأبحاث على إيجاد علاقات تجريبية لتحديد معامل النفاذية للترب الانتفاخية بدلالة الوزن الحجمي أوحد السيولة أو نسبة الفراغات البدائية وغيرها من العوامل دون الأخذ بعين الاعتبار تأثير ضغط الانتفاخ بشكل خاص على قيمة عامل النفاذية، وجدنا أنه من الضروري أن يتم التركيز على دراسة تأثير ضغط الانتفاخ على قيمة عامل النفاذية باعتباره العامل الأكثر تعبيراً عن السلوك الانتفاخي للترب الغضارية وبيان مدى تأثيره على قيمة عامل النفاذية.

!!

1- 6- الهدف من البحث:

بما أن إجراء تجارب النفاذية على الترب الناعمة يحتاج إلى مراقبة دقيقة وزمن طويل نسبياً لذلك وجدنا أنه من الضروري أن يتم تحديد طبيعة العلاقة بشكل دقيق بين عامل نفاذية التربة وعوامل انتفاخها خاصةً ضغط الانتفاخ كمتحول أساسي ليتم بذلك التوصل إلى الطريقة الأفضل لتحديد قيمة عامل النفاذية للترب الانتفاخية.

1- 7- منهجية البحث:

تم الاعتماد في بحثنا على المنهج التحليلي للمعلومات التي تم الحصول عليها من المصادر المختلفة ذات الصلة بموضوع البحث والتي تم تدعيمها بمجموعة من التجارب التي تم إجراؤها على ترب انتفاخية محلية وتحليل النتائج وترتيبها ومقارنتها مع بعضها للوصول إلى هدف البحث كما يلي:

أولاً: الإطلاع على أكبر عدد ممكن من المراجع ذات الصلة فيما يتعلق بدراسة السلوك الانتفاخي والعوامل المؤثرة على ضغط انتفاخ الترب الغضارية.

!!

ثانياً: دراسة وتحليل العوامل المؤثرة على نفاذية التربة والطرق المستخدمة لحساب عامل النفاذية مخبرياً وحقلياً من خلال المراجع ذات الصلة بالموضوع.

ثالثاً: إجراء تجارب النفاذية على ترب غضارية متفاوتة في قابليتها للانتفاخ وذات ضغوط انتفاخ مختلفة لبيان مدى تأثير ضغط الانتفاخ على قيمة عامل النفاذية.

رابعاً: صياغة علاقات رياضية تربط بين عامل النفاذية وضغط انتفاخ التربة وذلك اعتماداً على المنحنيات التجريبية التي تم التوصل إليها من التجارب المخبرية.

خامساً: الاعتماد على تقنية تطويق الانتفاخ الشاقولي للتربة لدراسة تأثير التطويق على النفاذية من خلال مقارنة النتائج مع نتائج المرحلة السابقة، ودراسة التطبيقات العملية لتجارب التطويق من خلال الدراسة الحقلية وتحليل واقع بعض السدود الترابية في سوريا.

!!

الفصل الثاني ...

!!

خواص الترب الانتفاخية وتأثير الماء عليها



2-1- التركيب الفلزي للغضاريات (بنية الغضار):

تسمح لنا المراقبة بالمجهر الالكتروني بالكشف عن أصغر الحبات المكونة للتربة الغضارية والتي نصل إليها بواسطة التشتيت أو التفريق حيث تتراوح أبعادها بين **(1 - 0.1)** ميكرون، ولهذه القطع أو الحبات الصغيرة جداً شكل الصفائح (الديسكات) الشديدة التسطح [10].

2-1-1- النماذج البلورية الأساسية:

تتكون الفلزات الغضارية **(Clay Minerals)** من سيليكات الألمنيوم أو المغنزيوم أو الحديد، وهناك نوعان رئيسيان من الوحدات البلورية التي تشكل الفلزات الغضارية، وهي:

1. الوحدة الرباعية **(Tetrahedral)** وهي مشكلة من اجتماع السيليكون والأوكسجين.
2. الوحدة الثمانية **(Octahedral)** المشكلة من هيدروكسيدات الألمنيوم أو المغنزيوم أو الحديد.

ويوضح الشكل (2-1) الوحدة الرباعية المؤلفة من أربع ذرات أوكسجين تحيط بذرة سيليكون واحدة، حيث تجتمع هذه الوحدات الرباعية لتشكل صفيحة سيليكا **(Silica sheet)** ونرمز لها بالرمز **(S)** [21].

أوكسجين ○   سيليكون ●

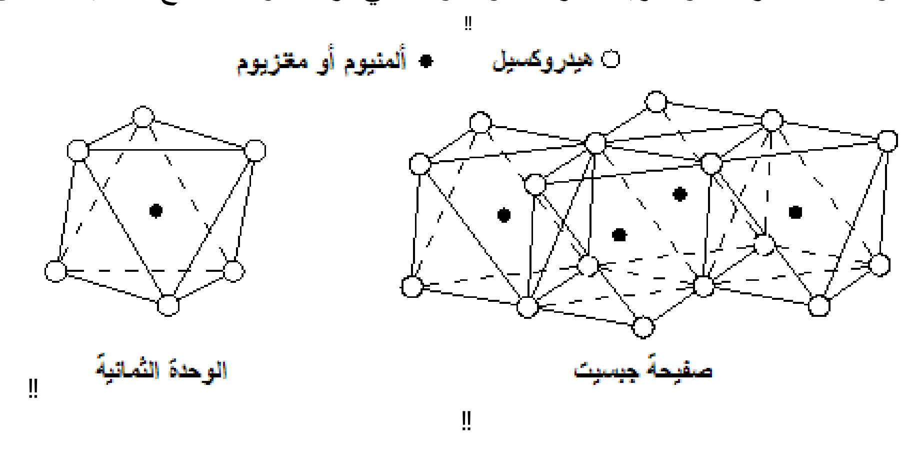
الوحدة الرباعية   صفيحة سيليكا

!!>21@ú! ƒ! !ŒšƒŽ! !!! ƒ! œ!Œš! !Œ1! 2!!¾! !Œ

ويبين الشكل (2-2) وحدة ثمانية مؤلفة من ست جزيئات هيدروكسيل تحيط بذرة ألمنيوم أو مغنزيوم. يؤدي اجتماع وحدات الألمنيوم الثمانية إلى تشكيل صفيحة جبسيت **(Gibbsite)** نرمز لها بالرمز **(G)**.

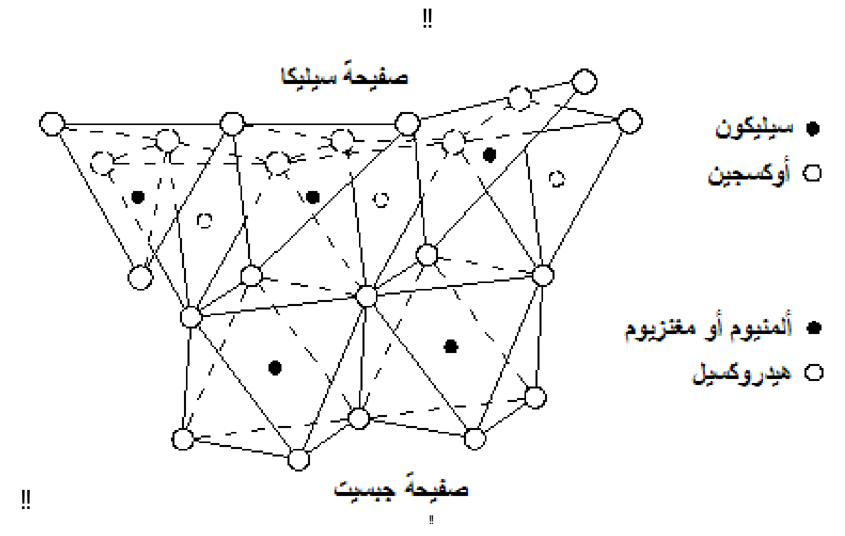
أما اجتماع وحدات المغنزيوم الثمانية فيؤدي إلى تشكيل صفيحة البروسيت **(Brucite)** وسنرمز لها بالرمز **(B)**، وعندما تتراكب صفائح السيليكا فوق الصفائح الثمانية تقوم ذرات الأوكسجين غير المتوازنة الشحنة باستبدال جزيئات الهيدروكسيل لتعديل شحنتها، الشكل (2-3)، ويتشكل لدينا الفلز الغضاري.

إن الفلزات الغضارية هي نتاج تراكب هذه الوحدات الأساسية مع بعضها البعض حيث تختلف الفلزات عن بعضها بالوحدات المتراكبة وبطريقة التراكب وبالقوى التي تربط الوحدات مع بعضها البعض.



!!>21@ ƒ! !! !ŒšƒŽ! !!! ƒœ!Œš! !Œ2! 2!!¾! !Œ





!!>21@ ! de!!Œ!Ž!Œ¼! !!! ƒ! !! !!šƒŽ! !! ! !dqƒ! !!šƒŽ!!!3! 2!!¾! !Œ

2- 1 -2- المجموعات الرئيسية للغضاريات:

1. **الكاولينيت (Kaolinite):**

يعتبر فلز الكاولينيت الفلز الغضاري الأكثر أهمية وهو غضار نقي أبيض اللون يتكون من تعاقب لوحدات مكونة من ارتباط صفيحتي (**G & S**) وفي حال حلت صفيحة بروسيت محل الجبسيت ينتج فلز السيربنتين (**Serpentine**)، ويوضح الشكل (2-7) طريقة تراكب الصفائح في فلز الكاولينيت. وتترابط الكتل المتلاحقة مع بعضها بواسطة نوعين من الروابط:

- قوى فاندرفالس.
- الروابط الهيدروجينية.

وهذا الربط القوي يفسر قابلية الكاولينيت الضعيفة للانتفاخ مقارنة مع الأنواع الأخرى من الفلزات الغضارية وبالتالي يعتبر هذا النوع من الغضاريات الأقل خطراً بالنسبة للمهندس الجيوتكنيكي [21].

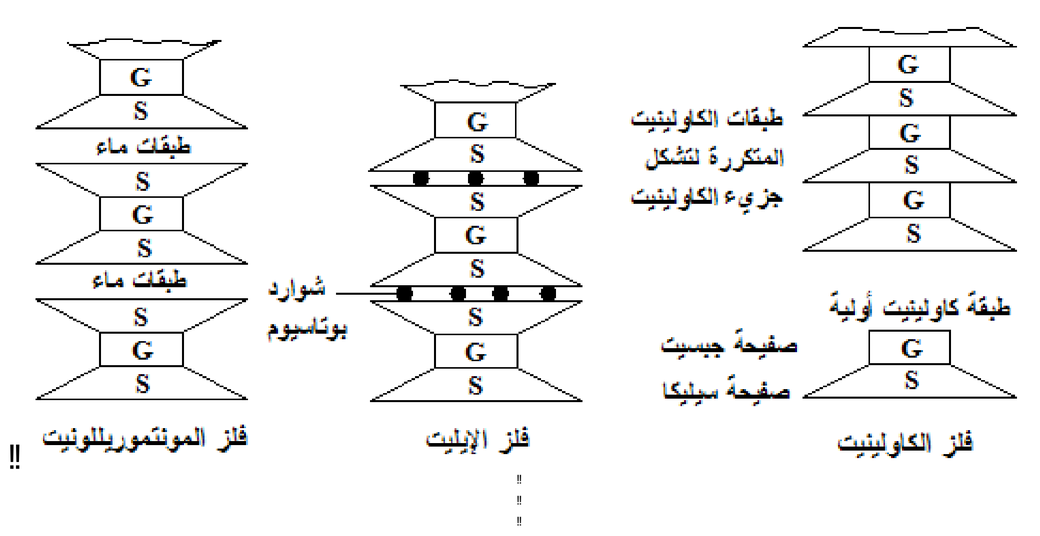
2. **الإيليت (Illite):**

يصنف من ضمن فلزات الغضار الشبيهة بالميكا أو الميكا المميهة حيث تجتمع صفيحتي سيليكا مع صفيحة جبسيت (**2S & G**) مع وجود شوارد البوتاسيوم لموازنة الشحنة الفائضة الناتجة عن وجود شوارد الألمنيوم التي حلت محل السيليكون كما أن وجود شوارد البوتاسيوم يعطي ربطاً جيداً (نتيجة التلاؤم بين الفراغ الموجود وقطر شاردة البوتاسيوم) لكن بدرجة أقل من الربط الموجود في حالة الكاولينيت، ويوضح الشكل (2-7) آلية تشكل فلز الإيليت [21].

3. **المونتموريللونيت (Montmorillonite):**

يمتلك فلز المونتموريللونيت بنية مشابهة لفلز الإيليت ولكن دون وجود شوارد البوتاسيوم مما يجعل الغضار قادراً على جذب كميات كبيرة من الماء إلى الفراغات الموجودة بين كل طبقتين متتاليتين لتعديل الشحنات السالبة فيه، مما يؤدي إلى ظهور الانتفاخ في التربة، وهكذا فإن الترب التي تكون فيها نسبة المونتموريللونيت مرتفعة تكون قابلة للانتفاخ أو التقلص الكبير وذلك تبعاً لتغير رطوبتها وينتمي إلى هذه العائلة غضار البنتونيت (**Bentonite**) الذي يستخدم بكثرة كسائل لحفر الآبار والجدران الوتدية. ويبين الشكل (2-7) آلية تشكل فلز المونتموريللونيت [21].





!! >21@ ... 7! 2!!¾! !Œ

2- 1- 3- توجه جزيئات أو حبات الغضار:

إن للمسافات الموجودة بين حبات الغضار وكذلك لتوجهات هذه الحبات تأثيراً كبيراً على الارتباط فيما بينها وبالتالي على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للتربة. ويمكن أن نميز عموماً نموذجين رئيسين للتوجهات [10]، الشكل (2-8):

- البنية المتندفة **(floccules)**: حرف مقابل سطح.
- البنية المشتتة **(disperse)**: سطح مقابل سطح.



!! >10@ ... 8! 2!!¾! !Œ

ومن المعلوم أن الجزيئات الغضارية لها توجهات أقرب إلى البنية المتندفة أو أبعد عنها وذلك بحسب ترسبها في وسط بحري أو وسط هادئ. فالغضاريات البحرية تكون أكثر انفتاحاً من تلك المترسبة أو المتوضعة في ماء هادئ. وفي الواقع إن تشديد القص وجهوده تسعى إلى توجيه الجزيئات نحو البنية المشتتة وهذه المعلومات التي تخص توجه جزيئات الغضار لها في الواقع أهمية كبرى حيث أنها تسمح بشرح الظواهر المعقدة المرتبطة بالتشديد وبمقاومة القص للغضاريات [10].

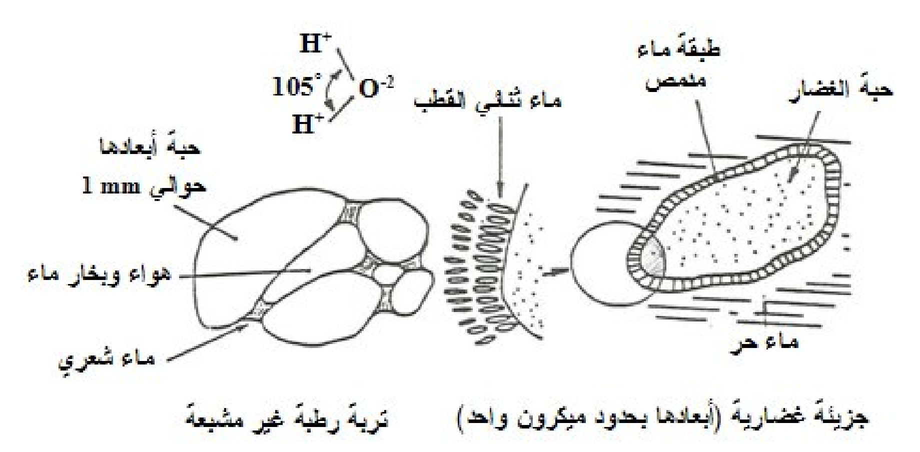
2- 1- 4- القوى الموجودة بين جزيئات الغضار:

بما أن الشحنات السالبة تسيطر على سطح حبات أو جزيئات الغضار فلا بد أن تتولد قوى تنافر بين الجزيئات الغضارية. وبالإضافة إلى قوى التنافر الموجودة توجد قوى تجاذب تسيطر عليها قوى ترابط! ثانوية تسمى قوى فاندرفالس **(Vander Waal's Forces)** وهي تابعة لثابت الناقلية الكهربائية للوسط الفاصل بين الجزيئات المتجاورة.

2- 2- طبقات الماء حول جزيئات الغضار:

1. طبقة الماء الحر: وهو الماء الذي يستطيع الجريان بين الحبات ويتبخر بشكل كامل عندما ننقله إلى ل من **100ºC** [5].

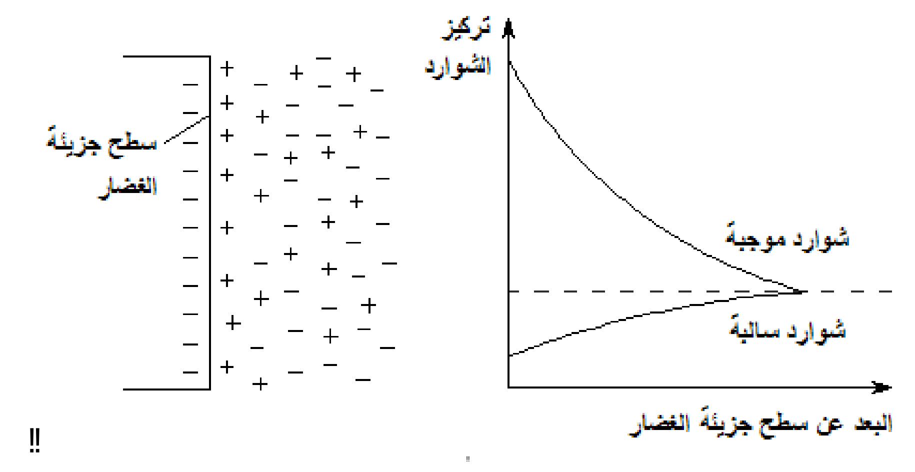
2. طبقة الماء الشعري: هذا النمط يكون ممسوكاً على شكل عدسات محدبة أو مقعرة بجوار نقاط التماس بين الحبات وذلك بواسطة القوى الشعرية التي تخلق بين تلك الحبات قوى تجاذب، وهنا الماء لا يمكن إلا أن يوجد بحضور الغاز أي الحالة غير المشبعة للتربة [5].
3. طبقة الماء المدمص: نصادف هذا النمط من الماء في الترب ذات الحبات الدقيقة جداً (قطرها الوسطي أصغر من **2 µm**) وتواجده ناتج عن ظاهرة الادمصاص أو الجذب للماء بواسطة الجزء الصلب. وهو مؤلف من قشرة أو قوقعة مشكلة من طبقات موجهة ثنائية القطب من H_2O. إن خواص هذا النمط مختلفة جداً عن خواص الماء الحر فهو غير متحرك ويظهر لزوجة مهمة تكسبه خواصاً مطابقة للحالة الوسط بين الصلب والسائل وهذا النمط من الماء لا يمكن ترحيله إلا بدرجة حرارة مرتفعة تصل إلى **300ºC**. إن هذه القشرة من الماء المدمص تؤدي دور المزلق بين الحبات ولها تأثير هام على الخواص الميكانيكية للترب الناعمة [5]، [6]، [10].



!!>10@ de!!Œ dš!¾š!! deŒ de! !!!9! 2!!¾! !Œ

2- 2- 1- طبقة الماء المدمصة في الترب الغضارية:

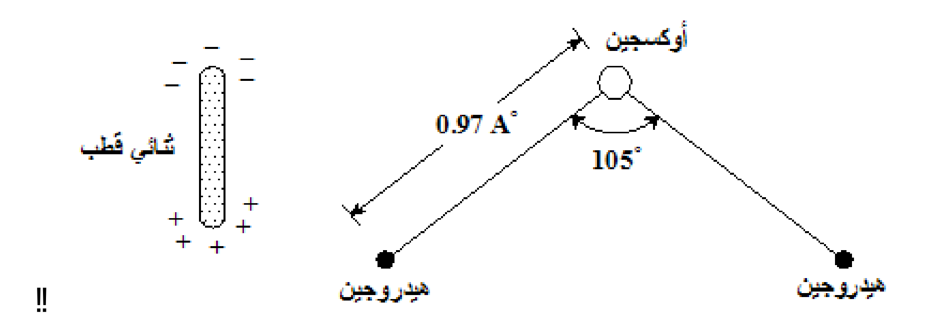
توجد بعض رواسب الماء على سطح جزيئات الغضار الجاف وعندما تتم إضافة الماء إلى الغضار تذوب هذه الرواسب وتسبح الشوارد الموجبة والسالبة الناتجة حول جزيئات الغضار، ويوضح الشكل (2- 10) منحني بياني لتغيرات تركيز الشوارد الموجبة والسالبة مع تغير المسافة عن جزيئة الغضار.



!!>34@ de!!Œ!ƒ! !¾š!ƒde! !!!!!! !!!Œde Œ!!! !!!10!! 2!!¾! !Œ

ونشير هنا إلى أن جزيئات الماء ثنائية الأقطاب حيث أن ذرات الهيدروجين لا تتوزع بشكل متناظر حول ذرات الأوكسجين أي أن جزيئة الماء تشبه قضيباً أحد طرفيه مشحون إيجاباً والآخر مشحون سلباً [5]،



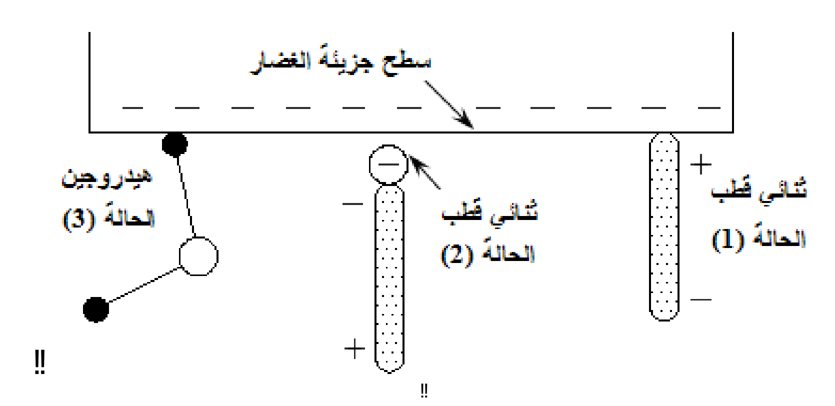


!!>34@! ! !!Œ/!dde!! deŒ!/! ! !!!11! 2!!¾! !Œ

ويمكن شرح كيفية انجذاب ثنائيات الأقطاب (جزيئات الماء) كهربائياً إلى سطح حبات الغضار تبعاً لثلاث آليات وفق ما يلي [5]، [6]:

1. الانجذاب بين السطوح المشحونة بشحنة سالبة في جزيئات الغضار والأطراف الموجبة لثنائيات الأقطاب المائية **(Dipoles)**.
2. انجذاب الشوارد الموجبة في طبقة الماء الممسوكة كهربائياً من قبل جزيئة الغضار **(Double layer)** إلى الأطراف المشحونة سلباً من ثنائيات الأقطاب المائية التي تنجذب بدورها إلى سطوح حبات الغضار المشحونة سلباً.
3. ارتباط ذرات الهيدروجين في جزيئات الماء بروابط هيدروجينية مع ذرات الأوكسجين الموجودة في جزيئات الغضار من جهة ومع ذرات الأوكسجين الموجودة في جزيئات الماء من جهة أخرى.

ويبين الشكل (2-12) أشكال انجذاب الماء إلى جزيئات الغضار.



!!>34@!š! !Œ!!de!Œde!!Œ dš!! ! ! ! !! !!!! deŒ Œ!Œ¾de !!!!12! 2!!¾! !Œ

ـمى الميـ اه المجذوبـ ة كهربائيـ اً والتـ ي تحـ يط بجزيئـ ات الغضـ ار باسـ م المـ اء الممسـ وك كهربائيـ اً **(Double layer water)** وتعـ ود اللدونـ ة فـ ي التـ رب الغضـ ارية إلـ ى وجـ ود هـ ذه الطبقـ ة الممسـ وكة كهربائيـ اً بقـ وة شـ ديدة مـ ع جزيئـ ة الغضـ ار، ونـ دعو هـ ذه الطبقـ ة باسـ م طبقـ ة المـ اء المدمصـ ة **(Absorbed Water)** [5]، [6].

2- 3- مفاهيم وتعاريف أساسية:

2- 3 - 1- التبادل الإيزومرفزمي (Isomorphism Substitution):

يتم هذا التبادل عند التشكل الأولي للفلزات الغضارية حيث يمكن أن يحل الألمنيوم بدل السيليكون أو يحل المغنزيوم بدل الألمنيوم في مركز الوحدات الأساسية بدون حدوث تغيير في التركيب البلوري للفلز أو التبادل مع المحافظة على الشكل [15]، [19].

2- 3- 2- طاقة التبادل الشاردي أو مفهوم سعة التبادل الكاتيوني (Cation Exchange Capacity):

إن ظاهرة التبادل الكاتيوني من أهم الظواهر التي تحدث في التربة تبعاً للباحث الأمريكي مارشال **(Marshal 1995)** في كتابه عن الغرويات **(Collides in Agriculture)** [15].

حيث أنه وخلال مرحلة تشكل الفلزات الغضارية بأنواعها المختلفة يحدث تغير في مواقع الشوارد المركزية كأن تحل ذرة ألمنيوم محل السيليكون مثلاً، عندها سيتولد نقص في الشحنة وبالتالي تنبع الحاجة إلى تواجد عدد من الشحنات الموجبة على سطح حبة الغضار لتحقيق التوازن الناتج عن نقص الشحنة الموجبة وهذا يعتبر خاصة ذاتية للتربة [15].

إن كمية الشوارد الموجبة أو الكاتيونات اللازمة لموازنة الشحنة السالبة الفائضة تدعى بطاقة التبادل الشاردي **(CEC)** وتعرّف بأنها كمية الشوارد القابلة للتبادل معبراً عنها بالـ **mill equivalent** (الميلي مكافئ) في الـ **(100 gr)** من الغضار الجاف [41].

نوضح هنا بأن تحديد قيمة الـ **(CEC)** لتربة ما يتطلب إجراء تجارب خاصة لهذا الغرض، ولكن عندما لا تتوفر الإمكانية لإجراء هذه التجارب يمكن استخدام العلاقة التجريبية التي أوجدها الباحث **Lytton** بدلالة حد اللدونة للتربة المدروسة [41]:

$$CEC = (Wp\ \%)^{1.17}$$

ونبين في الجدول (2-1) قيم السطح النوعي وقيم التبادل الكاتيوني لأهم فلزات الغضار:

الجدول (2-1): قيم (CEC) والسطح النوعي لأهم فلزات الغضار [34]

!! !Ž!Œ	CEC (meq/100 gr)	(m^2/gr)!! ! ! !!ŒŠ! ! !Œ
Kaolinite	**3**	**10 ~ 20**
Illite	**25**	**80 ~ 100**
!!Montmorillonite	**100**	**800**
!!Chlorite	**20**	**50 ~ 50**
!!Vermiculite	**150**	**5 ~ 400**
Halloysite ($4H_2O$)	**12**	**40**
Halloysite ($2H_2O$)	**12**	**40**

2- 3- 3- السطح النوعي (Specific Surface):

يعرف السطح النوعي للتربة بأنه مجموع مساحات سطوح الحبات في **(1 gr)** من التربة ويعبر عنه عادةً بـ **(m^2/gr)** وتتعلق قيمته بشكل الحبات حيث أن السطح النوعي للحبات المسطحة الشكل أكبر منه للحبات الكروية [15]، [21].

إن النشاط السطحي لكل من الرمل والسيلت قليل جداً مقارنة مع النشاط السطحي للغضار نظراً لكبر السطح النوعي لحبات الغضار والذي يؤثر بشكل كبير على العديد من مظاهر سلوك الترب الغضارية حيث تزداد قدرته على ادمصاص وتبادل الكاتيونات القابلة للتبادل وزيادة الاحتفاظ بالماء [15]، [21].

ويتأثر السطح النوعي بأبعاد حبات التربة فإذا أخذنا عدة منيرالات غضارية ذات كتلة متماثلة فإن أكبر مساحة سطحية ستكون في أصغر الذرات أبعاداً. إن قيم السطح النوعي للكاولينيت والإيليت والمونتموريللونيت هي على الترتيب **(15, 90, 800 m^2/gr)** [34].

ويمكن تقدير السطح النوعي بالاعتماد على حسابات مبنية على شكل وحجم الحبات الغضارية. ويمكن أيضاً تقدير السطح النوعي مخبرياً بأن يتم تعيين كمية السائل أو الغاز اللازمة لتكوين طبقة أحادية الجزيء على سطح حبة الغضار حيث يتم إشباع التربة الجافة بمحلول الايثيلين جليكول **(EGME)** بوجود ويتم العمل على إشباع جميع السطوح بطبقة واحدة فقط وذلك بالتخلص من

الكمية الزائدة بواسطة التفريغ باستخدام كلوريد الكالسيوم المشبع **($Ca Cl_2$)** ووضع العينة في المجفف مما يساعد على تغطية التربة بطبقة واحدة فقط من المحلول، ومن خلال معرفة وزن طبقة الايثيلين جليكول التي تغلف سطح التربة يمكن تقدير مساحة السطح النوعي للتربة المدروسة [15].

2- 3- 4- الادمصاص (Adsorption):

يعرف الادمصاص بأنه زيادة تركيز مادة على سطح الانفصال بين حالتين مختلفتين من حالات التربة، أحدهما الحالة الصلبة والأخرى الحالة السائلة أو الغازية، وهناك نوعين من الادمصاص هما [7]:

1. الادمصاص الطبيعي: يتميز بأن الروابط بين المادة المدمصة والسطح الذي يحدث عليه الادمصاص من نوع فاندرفالس **(Vander Waal's Forces)** والطاقة المصاحبة له تعتبر صغيرة وتتراوح من **(1000 - 100)** كالوري، كما أن هذا النوع من الادمصاص يكون عكسياً أي أن منحني الادمصاص ينطبق على منحني عكس الادمصاص [7].
2. الادمصاص الكيميائي: يتميز عن سابقه بأن الروابط بين المادة المدمصة والسطح الذي يحدث عليه الادمصاص روابط قوية أما الطاقة المصاحبة للادمصاص تكون كبيرة وتتراوح بين **(100000 - 10000)** كالوري، وهذا النوع من الادمصاص غير عكسي ويلزم لاستخلاص المادة المدمصة طاقة كبيرة [7].

2- 3- 5- اختبار انتفاخية التربة (Swelling Test):

يعرف انتفاخ التربة بأنه تشوه شاقولي ناتج عن نهوض سطح التربة بسبب الترطيب، ويعبر عن الانتفاخ دوماً بالانتفاخ النسبي **(ε_{SW})** وهو الفرق بين ارتفاع التربة في حالة الإشباع **h_{sat}** وارتفاعها الطبيعي **h_n**، وفي حال عدم وجود حمولات مطبقة على التربة يسمى الانتفاخ بالانتفاخ النسبي الحر **(ε^o_{SW})** [3]، [17]:

$$!! \ \varepsilon^{O}_{SW}(\%) = \frac{h_{sat} - h_n}{h_n} \times 100$$

!

ومن الاختبارات السهلة التي يمكن من خلالها تحديد الانتفاخ الحر للتربة **(Free - Swell Test)** تتم عن طريق وضع **($10\ cm^3$)** من التربة الجافة المارة من المنخل رقم **(40)** أي **(425 µm)** في إناء مدرج حتى **($100\ cm^3$)** ثم يتم ملؤه بالماء ونقوم بملاحظة ازدياد حجم التربة حتى ثباته. ويتم تحديد مقدار الانتفاخ بالمعادلة التالية [9]، [6]:

الانتفاخ النسبي الحر **(%)** = (الحجم المتغير - الحجم الأصلي) / الحجم الأصلي

!!

2- 4- مفهوم ضغط الانتفاخ (Expansive Pressure):

تتميز التربة الانتفاخية كما ذكرنا سابقاً بقدرتها على التغيرات الحجمية عند تغير رطوبتها. فعند حدوث زيادة في الترطيب تتعرض التربة الانتفاخية إلى زيادة في الحجم يظهر على شكل تشوه شاقولي يسمى انتفاخ، ويظهر على سطح الأرض والمنشآت المشيدة عليها على شكل نهوض. كما أن هذا النوع من التربة يتناقص حجمه عند انخفاض رطوبته وبالتالي تحدث ظاهرة التقلص وهي نقصان حجم الكتلة الترابية بالنسبة للحالة البدائية من الرطوبة [16]، [17].

ويعرف ضغط الانتفاخ (σ_{sw}): بأنه الضغط الداخلي المتولد في التربة نتيجة زيادة حجمها (انتفاخها) وهو يساوي الإجهاد الناظمي المطبق على التربة وذلك بعد ترطيبها حتى يتم منع حصول النهوض (الانتفاخ) فيها، ويمكن تسميته عتبة الانتفاخ لأنه في حال كان الإجهاد المطبق على التربة أقل من ضغط انتفاخها فسوف تنتفخ [14]، [29]، [31]، [32].

2- 4- 1- آلية تولد ضغط الانتفاخ:

لكي نفهم كيفية تأثير ضغط الانتفاخ ومقداره سنقوم بدراسة توازن القوى المؤثرة على الكتلة الترابية وهي على الترتيب [17]، [27]:

- إجهاد الوزن الذاتي **(σ_g)**: ويكون معاكساً لمنحى ضغط الانتفاخ.

يق الحمولات الخارجية **(σ_o)**.



- ضغط ماء المسام (الضغط الشعري) (σ_K): يحدث الانتفاخ عندما يتم ترطيب التربة وبالتالي تتولد قوى رفع شعري نحو الأعلى.
- قوى الارتباط الداخلي لبنية التربة عند الانتفاخ (σ_C): وهي تعاكس الإجهادات المؤثرة.

وبإسقاط القوى السابقة على الشاقول وباعتبار أن ضغط الانتفاخ يتوق إلى تشوه ذرات التربة نحو الأعلى، نجد ما يلي:

$$\sigma_o + \sigma_g + \sigma_c - \sigma_k - \sigma_{sw} = 0$$

إن الطرف الثاني من المعادلة يساوي الصفر بسبب عدم وجود تشوه عند تولد ضغط الانتفاخ (حالة توازن التربة). وبما أن انتفاخ التربة يكتمل عندما يحصل إشباع لكامل ذراتها فإن الضغط الشعري يكون معدوماً أي أن ($\sigma_k = 0$)، ومنه فإن:

$$\sigma_{sw} = \sigma_o + \sigma_g + \sigma_c$$

2-5- تصنيف الترب الانتفاخية:

يوجد العديد من الطرق المتبعة لتصنيف الترب الانتفاخية، حيث يربط بعض أخصائيي الجيوتكنيك انتفاخ التربة الغضارية بعامل واحد فقط، ونذكر من هؤلاء الباحثين [19]، [33] **(Altmeyer 1955, Rangaratham & Satyanarayana 1965, Snethen 1980)**، فقد أعطوا تصانيف لإمكانية الانتفاخ كتابع لحد التقلص W_S ودليل التقلص I_R ودليل اللدونة I_P على التوالي، ويعرف دليل التقلص بأنه الفرق بين حد السيولة W_L وحد التقلص W_S.

وتبين الجداول (2 - 2)، (2 - 3)، (2 - 4) تصانيف الترب الانتفاخية وفقاً لهؤلاء الباحثين:

الجدول (2- 2): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Altmeyer 1955) [19]

! œž!!! Œƒœ!	W_S (%)
! ƒœ	< 10
!!!š	12 ! !10
!! Ž!!!	> 12

الجدول (2- 3): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Rangaratham & Satyanarayana 1965) [19]

! œž!!! Œƒœ!	I_R (%)
!! Ž!!!	0 ! 20
!!!!!!	20 ! 30
! ƒœ	30 ! 60
Œ!! ƒœ	> 60

الجدول (2- 4): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Snethen 1980) [9]

! œž!!! Œƒœ!	I_P (%)
!! Ž!!!	< 18
!!!!!!	22 ! 32
! ƒœ	32 ! 35
Œ!! ƒœ	> 35



كما أعطى الباحث **(Seed 1962)** [9] تصنيف الانتفاخ كتابع لدليل اللدونة وذلك للترب ذات المحتوى الغضاري الذي يتراوح بين **(8 ~ 65) %**، الجدول (2 - 5)، وتعرف إمكانية الانتفاخ (ε_S) بأنها النسبة المئوية لانتفاخ عينة غضارية مرصوصة عند الرطوبة المثالية ومعرضة لحمولة مقدارها **(7 Kpa)**، وتعطى بالعلاقة:

$$\varepsilon_S = 10^{-5} \times (I_P)^{2.24}$$

الجدول (2- 5): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Seed 1962) [9]

I_P (%)	ε_S (%)	! ǿ!!! Œƒde!
20 ! 38	5 ! 25	! ƒde
10 ! 20	1.5 ô 5	! !!!!!
0 ! 10	0 ! 1.5	!! Ž! !!

ويمكن تصنيف الترب الانتفاخية وفق الكود الروسي **(SNIP)** كتابع للانتفاخ النسبي الحر [19]، [28]:

الجدول (2- 6): تصنيف الترب الانتفاخية حسب الكود الروسي (SNIP) [19]

ε^o_{SW} (%)	! ǿ!!! Œƒde!
≥ 12	! ƒde
8 ! 12	!!! ! !!!
4 ! 8	!! Ž! !!

ويؤخذ على التصنيف السابق أنه لا يوجد بيان للرطوبة البدائية للتربة المدروسة.

وقد ربط بعض الباحثين الآخرين إمكانية الانتفاخ بمعاملين من معاملات التربة ونجد ضمن هذه المجموعة من التصانيف تصنيف مؤسسة أبحاث البناء **(BRE 1980)** [19] الذي يعتمد على تصنيف انتفاخ التربة كتابع لدليل اللدونة ونسبة المواد الغضارية التي أبعادها أقل من **(2 μm)**، وهو موضح في الجدول (2 - 7):

الجدول (2 - 7): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (BRE 1980) [19]

I_P (%)	< 2 μm (%)	! ǿ!!! Œƒde!
> 35	> 95	Œ !! ƒde
22 ! 35	60 ! 95	! ƒde
10 ! 22	30 ! 60	! !!!!!
< 18	< 30	!! Ž! !!

كما نجد تصنيف الباحث **(Chen 1988)** [9]، [32] الذي يستند على تصنيف انتفاخ التربة كتابع لحد السيولة ونسبة المواد التي أبعادها أقل من **(74 μm)**، وهو موضح في الجدول (2 - 8):

الجدول (2 - 8): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Chen 1988) [32]

< 74 μm (%)	W_L (%)	(Mpa)!! Œ! !6!!!!!! ǿ!!! Œ!	! ǿ!!! Œƒde!
> 95	> 60	1	Œ !! ƒde
60 ! 95	40 ô 60	0.25 ô 0.75	

30 ! 60	30 ô 40	0.15 ô 0.25	! !!!!!
< 30	< 30	< 0.05	!! Ž! !!

كذلك اقترح الباحثان (Vijayvergiya & Ghazzaly 1973) [19]، [29] تصنيفاً يعتمد على دليل اللدونة وحد السيولة، حيث تم تقسيم مخطط كاساغراندي (Casagrande) إلى منطقتين بواسطة الخط A، الشكل (2 - 16)، بحيث تقع الترب الانتفاخية فوق الخط وغير الانتفاخية تحته.



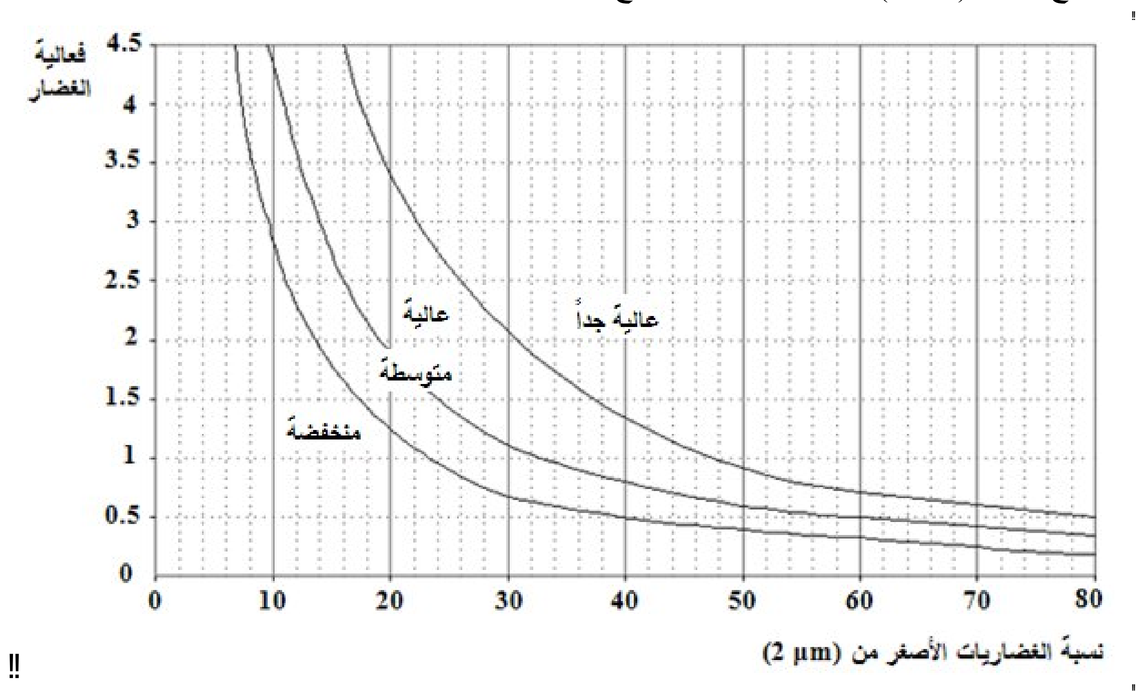
>29@Vijayvergiya & Ghazzaly 1973)!ž !!!! ꜰ! œ̃!! Œ! !!Œ ꜰ!! !!!!16!! 2!!¾! !Œ

من جهة أخرى فقد وضع الباحث (Seed 1962) [9]، [19] مخططاً يوضح إمكانية الانتفاخ تبعاً لفعالية الغضار والنسبة المئوية للغضار في التربة المدروسة. وتعرف فعالية الغضار (النشاط الفردي للغضار) تبعاً لـ (Skempton 1953) بأنها النسبة بين دليل اللدونة ومعيار الكمية الغضارية:

$$A_C = I_P / (> 2\mu m) \%$$

حيث: (> 2 µm) هي نسبة المواد الغضارية التي أبعادها أقل من (2 µm).

ويوضح الشكل (2 - 17) مخطط تصنيف الانتفاخ وفقاً للباحث Seed:



الشكل (2- 17): مخطط تصنيف الترب الانتفاخية وفق (Seed 1962) [9]



وقد وجد باحثون آخرون ضرورة استخدام ثلاثة معاملات لتقدير إمكانية الانتفاخ لتربة ما [9]، حيث يوضح الجدول (2 - 9) تصنيف **(Holtz, Gibbs 1956)** تبعاً لنسبة المواد الغضارية ودليل اللدونة وحد التقلص. كذلك يبين الجدول (2 - 10) تصنيف **(Dakshhanamurthy, Raman 1973)** الذي يعطي إمكانية الانتفاخ كتابع لدليل اللدونة وحد السيولة وحد التقلص.

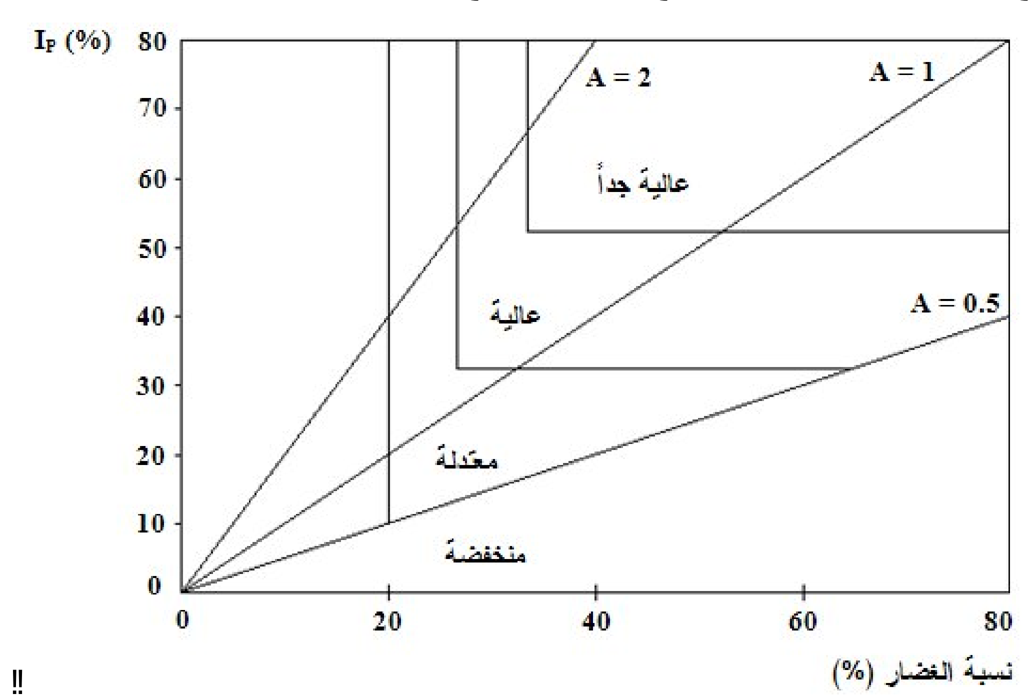
الجدول (2- 9): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Holtz, Gibbs 1956) [9]

< 2 µm (%)	W_S (%)	I_P (%)	! ƒ!!!!!! !!!! !!!!ŒU (%)	! œž!!! ŒEƒ!œ‹!
> 28	< 10	< 35	> 30	ŒE!! ƒ!œ
20 – 13	7 – 10	25 – 40	20 – 30	! ƒ!œ
13 – 23	10 – 15	15 – 30	10 – 30	!!!!!!

الجدول (2- 10): تصنيف الترب الانتفاخية حسب (Dakshhanamurthy, Raman 1973) [9]

W_L (%)	W_S (%)	I_P (%)	! œž!!! ŒEƒ!œ‹!
50 – 70	7 – 12	25 – 35	! ƒ!œ
35 – 50	10 – 15	15 – 25	!!!!!!
20 – 35	> 15	< 18	!! Ž! !!

كما اقترح الباحثان **(Donaldson, Williams 1980)** [19] مخططاً يمكن من خلاله تقدير إمكانية الانتفاخ اعتماداً على فعالية الغضار ونسبة الغضاريات (المواد ذات الأبعاد الأقل من **2 µm**) ودليل اللدونة، ويوضح الشكل (2 - 18) المخطط المقترح لتصنيف الانتفاخ:



الشكل (2- 18): مخطط مقترح لتصنيف الترب الانتفاخية وفق (Donaldson, Williams 1980) [19]

واعتماداً على التصنيف السابق اشتق الباحث **(Van Der Marwe 1983)** علاقة لحساب الانتفاخ الحقلي كتابع لحدود أتربرغ ولسماكة طبقة التربة الانتفاخية [19]:



$$\Delta H = D \cdot F \cdot \varepsilon_S$$



حيث أن:

ΔH: مقدار الانتفاخ بالمتر.

D: سماكة التربة الانتفاخية بالمتر.

F: معامل تخفيض للحمولات ويساوي ($10^{6.1}$ / **D -**).

ε_S: رقم معبر عن إمكانية الانتفاخ ونحصل عليه من المخطط السابق تبعاً لموقع التربة على المخطط.

ومما سبق نجد أن كل أساليب تصنيف الترب الانتفاخية سواء المذكورة سابقاً أو التي لم تذكر ليست إلا مؤشرات مبدئية على إمكانية انتفاخ التربة، والقيم الحقيقية للانتفاخ التي تحدث على أرض الواقع قد لا تتوافق مع هذه التصنيفات حيث يجب الانتباه إلى الأهمية الكبيرة للظروف المناخية السائدة في المنطقة المدروسة، كما أنه يمكن لتربتين لهما نفس القدرة على الانتفاخ من حيث التصنيف المبدئي أن تظهرا سلوكاً مختلفاً من حيث قيم الانتفاخ الحاصلة تبعاً لشدة التغيرات المناخية في كل منطقة **(Seed 1962)** [19]، [28]، [29]، [32].

2- 7- طرق تحديد ضغط الانتفاخ:

2- 7- 1- الطرق المباشرة:

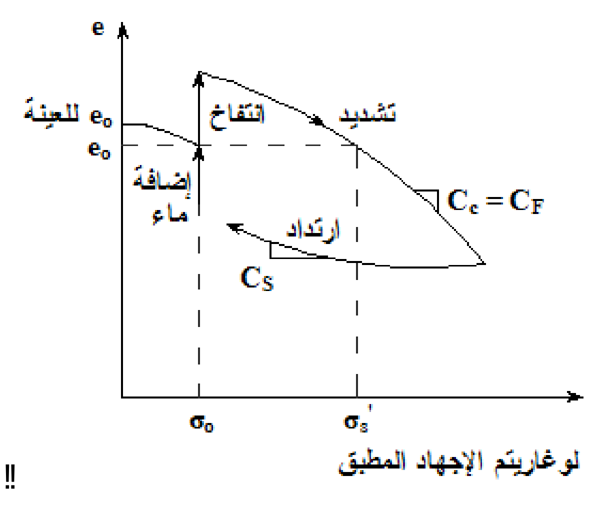
2- 7- 1- 1- تجربة الآدومتر أحادية الاتجاه:

تعتبر تجربة الآدومتر أحادية الاتجاه التجربة الأكثر شيوعاً في مجال التنبؤ بالانتفاخ وضغط الانتفاخ. ويوجد حالياً العديد من الأساليب المخبرية المستخدمة في إنجاز تجربة الآدومتر بهدف تقدير ضغط الانتفاخ، حيث تختلف هذه الطرق من حيث أسلوب تتالي التحميل والحمولات الخارجية المطبقة والشروط الطرفية، وكلها تهدف إلى محاكاة الشروط الحقلية [6]، [8]، [22].

بصورة عامة يمكن جمع هذه الطرق في مجموعتين رئيسيتين من تجارب الانتفاخ باستخدام الآدومتر وهي مجموعة تجارب التشديد - الانتفاخ، والتي تعتمد على تحميل أولي لعينة غير مشبعة وذلك لتوصيف الإجهادات على هذه العينة قبل الإشباع. ومن ثم يسمح لهذه العينة بالانتفاخ تحت تأثير الأحمال السابقة عن طريق إشباعها بالماء. تمثل هذه الحمولة الابتدائية الحمولات الإضافية الناتجة عن الردم فوق منسوب التأسيس، أو حمولة الردم والحمولة الإنشائية للأساس، أو حمولات كيفية أخرى. وبعد انتهاء الانتفاخ يتم متابعة التحميل ومن ثم التفريغ وفقاً للطرق الاعتيادية [8]، [10]، [22].

عادةً ما يعرف ضغط الانتفاخ في هذه المجموعة من التجارب بأنه الإجهاد المطلوب لإعادة ضغط عينة تامة الانتفاخ إلى حجمها الابتدائي قبل الانتفاخ [10].

ويوضح الشكل (2 - 23) مخططاً نموذجياً لمعطيات ونتائج هذا النوع من التجارب، حيث يمثل σ_o الإجهاد الذي تم ترطيب العينة عنده و σ_{sw} هو ضغط الانتفاخ وفقاً للتعريف السابق.

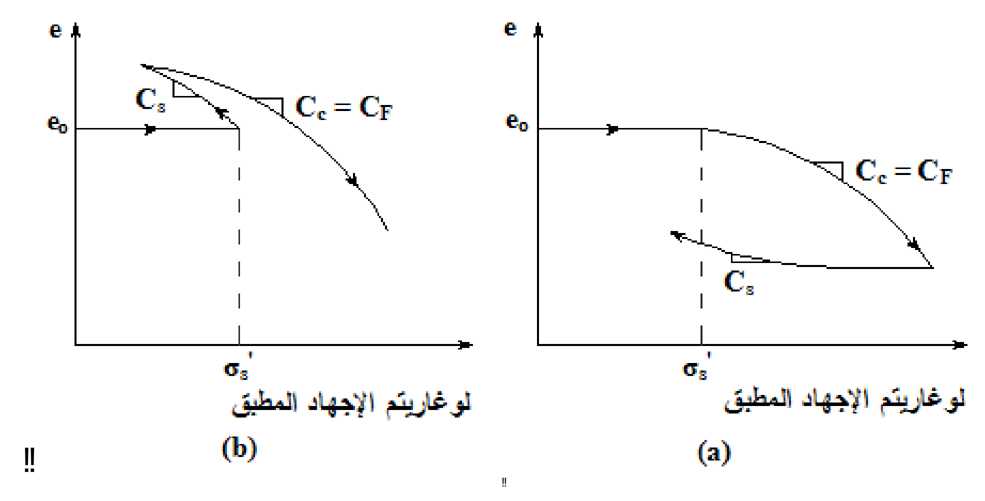


!!

الشكل (2- 23): مخطط نموذجي لنتائج تجربة التشديد - الانتفاخ [10]



في المجموعة الثانية من التجارب نجد تجارب الحجم الثابت أو تجارب ضغط الانتفاخ وفيها يتم ترطيب العينة في الآدومتر في الوقت الذي يتم فيه منع العينة من الانتفاخ [10]، [22].
ويعرف ضغط الانتفاخ في هذه الحالة بأنه الإجهاد الأعظمي المطلوب تطبيقه للمحافظة على حجم ثابت للعينة، وحالما ينتهي ضغط الانتفاخ من التزايد بعد الغمر يمكن أن يتم تفريغ الحمولات.
يوضح الشكل (2 - 24) مخططاً نموذجياً لمعطيات هذا النوع من التجارب حيث يمثل **(a)** عينة تم تشديدها إلى ما بعد ضغط الانتفاخ، ويمثل **(b)** ارتداد عينة تم نزع حمولاتها ابتداءً من ضغط الانتفاخ.



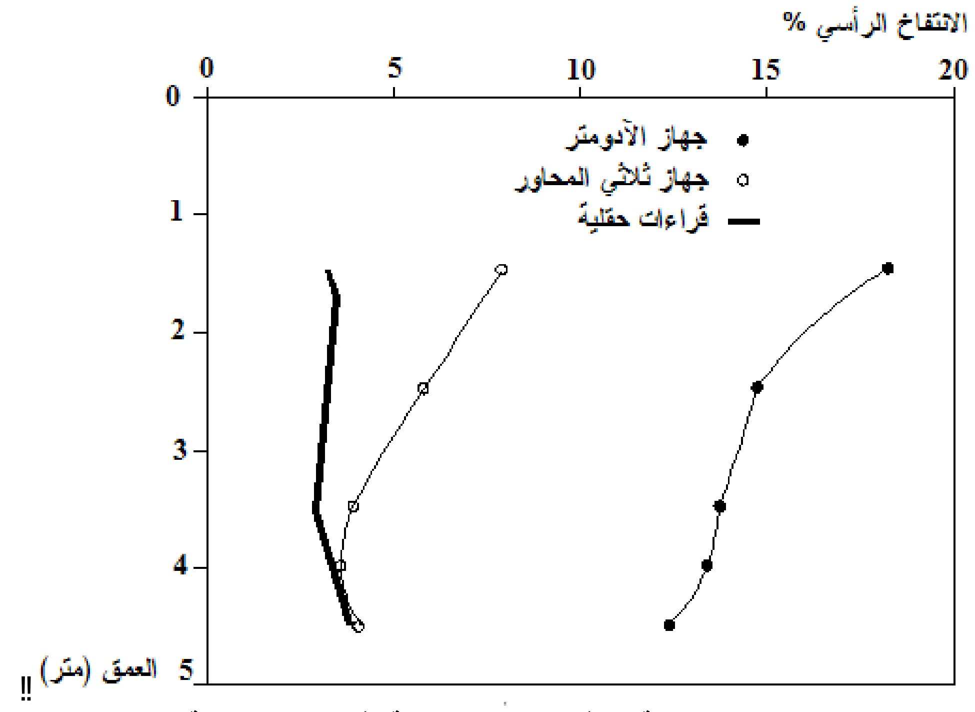
!!>10@ !ﺪﻜﺸﺗ! š!ﺸﺗ!! ! !!! !ﺪﻜ!! ! ! ! !!! ! ! ! !!!24!! 2!!¾! !ﺸ

في كلا المجموعتين من التجارب يجب أن يتم تحليل النتائج وتفسيرها مع أخذ توالي التحميل والترطيب واضطراب العينة وانضغاطية جهاز الآدومتر بعين الاعتبار.

2- 7- 1- 2- تجربة جهاز الضغط ثلاثي المحاور (Triaxial Test):

يسمح للعينة في هذه التجربة - بعد ترطيبها بالماء - بالانتفاخ في جميع الاتجاهات. ويمكن قياس الانتفاخ الحجمي بواسطة هذا الجهاز. ويتميز هذا الجهاز بأنه يمثل ما يحدث للتربة في الحقل، حيث يسمح للعينة بالانتفاخ في جميع الاتجاهات وذلك خلاف ما يحدث في جهاز الآدومتر حيث يسمح للعينة بالانتفاخ في الاتجاه الشاقولي فقط. كما أنه في جهاز ثلاثي المحاور يمكن قياس الانتفاخ الرأسي وكذلك الانتفاخ الحجمي للعينة وبالتالي فإنه يمكن حساب الانتفاخ الجانبي في هذا الجهاز [9]، [22]. وفي إحدى الدراسات الحديثة التي أجريت على الترب الانتفاخية في المملكة العربية السعودية تبين أن قيم الانتفاخ المقاسة باستخدام جهاز ثلاثي المحاور كانت قريبة من قيم الانتفاخ المقاسة في الحقل وذلك عند مقارنتها بنتائج تجربة الآدومتر وحيد الاتجاه حيث أعطت قيماً عالية نسبياً [9]، كما هو موضح في الشكل (2 - 25).





الشكل (2- 25): مقارنة بين قيم الانتفاخ التجريبية وقيم الانتفاخ الحقلية [9]

2- 7- 2- الطرق غير المباشرة:

يوجد العديد من العلاقات النظرية التي تسمح بتقدير مقدار الانتفاخ وضغط الانتفاخ المتوقع تولده حقلياً وهذه العلاقات تربط خواص الانتفاخ بالخواص الفيزيائية للتربة والتي نحصل عليها بالتجارب المخبرية الخاصة بتوصيف التربة (الدراسة الجيوتكنيكية)، وسوف نستعرض فيما يلي بعض الأساليب العالمية المستخدمة في تقدير انتفاخ التربة وحساب ضغط الانتفاخ [8]، [17]، [18]، [19]، [31]، [40]:

1. التجربة المزدوجة **(Jennings & Knight 1957)**: يتم إجراء التجربة على عينتين متجاورتين، حيث تجرى التجربة الأولى كتجربة تشديد بالطريقة الاعتيادية وعند الرطوبة الطبيعية في حين تكون التجربة الثانية تجربة تشديد - انتفاخ تحت تأثير حمولة إضافية صغيرة.
2. طريقة الـ **(Volumenometer)** للباحث **(Debruijn 1961)**: تجرى التجربة بجهاز خاص يسمى **(Volumenometer)** وهو جهاز معدل عن جهاز الآدومتر، حيث يتم ترطيب عينات مجففة بالهواء بشكل بطيء ثم تجرى التجربة بتأثير أحمال إضافية مختلفة.
3. طريقة كولورادو **(Schuster & Sampson & Budge 1965)**: يتم إجراء التجربة على عينتين متجاورتين، التجربة الأولى: تجربة تشديد – انتفاخ بتأثير أحمال إضافية مختلفة، والتجربة الثانية تجربة حجم ثابت - ارتداد وذلك عند نزع الحمولات.
4. طريقة الباحث الكندي **(Noble 1966)**: يتم إجراء تجارب تشديد – انتفاخ على عينات مخربة ومشكلة وتحت تأثير حمولات إضافية مختلفة، ثم تعاد التجارب على عينات سليمة وذلك بهدف استنتاج علاقات تجريبية للغضاريات المدروسة.
5. طريقة الباحث **(Sullivan & McClelland 1969)**: وهي تجربة حجم ثابت على عينات برطوبات مختلفة ومعرضة لحمولات إضافية عند الترطيب.
6. طريقة معهد أبحاث حيفا المحتلة **(Wiseman & Komorink & Ben - Yacob 1969)**: تجرى تجارب الحجم الثابت عند أعماق مختلفة وتجرى تجارب تشديد – انتفاخ عند ضغوط إضافية ابتدائية مختلفة.



7. طريقة الباحث الأمريكي **(Navy 1971)**: يتم إجراء تجارب عند أحمال إضافية مختلفة تمثل حمولات الردم والحمولات الإنشائية للأساس، وبالنتيجة يمكن تحديد منحنيات انتفاخ التربة المدروسة مع العمق.
8. طريقة الباحث الأمريكي **(Gibbs 1973)**: وتسمى طريقة الـ **(USBR)**، وهي تجربة مزدوجة: التجربة الأولى هي تجربة تشديد - انتفاخ تحت تأثير حمولة خفيفة **(1 psi)**، والتجربة الثانية هي تجربة الحجم الثابت.
9. طريقة النمذجة المباشرة **(Smith 1973)**: يتم إجراء مجموعة تجارب تشديد – انتفاخ تجرى على عينات مختلفة الرطوبة مع تطبيق حمولات الردم أو حمولات الأساس.
10. طريقة قسم الطرق في الميسيسيبي **(Teng & Clisby 1975)**: تجرى تجارب تشديد - انتفاخ على عينات مشكلة أو سليمة وبرطوبات مختلفة وتحت تأثير حمولات الردم.
11. التجربة مضبوطة الانفعال **(Porter & Nelson 1980)**: يمكن حساب ضغط الانتفاخ في هذه التجربة بالمحافظة على حجم ثابت للعينة المدروسة عند الترطيب ثم يتبع ذلك تخفيض تدريجي للضغط المطبق على العينة مع ضبط التشوهات الحاصلة.
12. طريقة جامعة **(Saskatchewan)** في كندا: توصل إليها الباحث **(Fredlund 1980)** حيث تجرى تجربة الحجم الثابت ويتم تحليل النتائج مع الأخذ بعين الاعتبار تصحيح أخطاء اضطراب العينة وأخطاء القياسات.
13. طريقة الـ **(ASTM)**: يمكن إجراء التجربة بثلاثة أساليب مختلفة وذلك تبعاً لطريقة التحميل في الموقع وهي كما يلي: أولاً: طريقة الانتفاخ - تشديد، ثانياً: تشديد - انتفاخ، ثالثاً: طريقة الحجم الثابت، وتعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق استخداماً في بلادنا.
14. طريقة الكود الروسي **(SNIP)**: توجد طريقتان لتحديد ضغط الانتفاخ، الطريقة الأولى: تستخدم عينة واحدة يتم إشباعها بشكل حر ثم تطبق الحمولات بشكل تدريجي حتى تعود العينة إلى حجمها الأصلي قبل الإشباع. الطريقة الثانية: تستخدم عدة عينات متماثلة وكل عينة منها معرضة لحمولة خارجية مختلفة عند الإشباع.

!!
!!
!!
!!
!!
!!



الفصل الثالث ...

!!

هيدروليك التربة وجريان الماء فيها

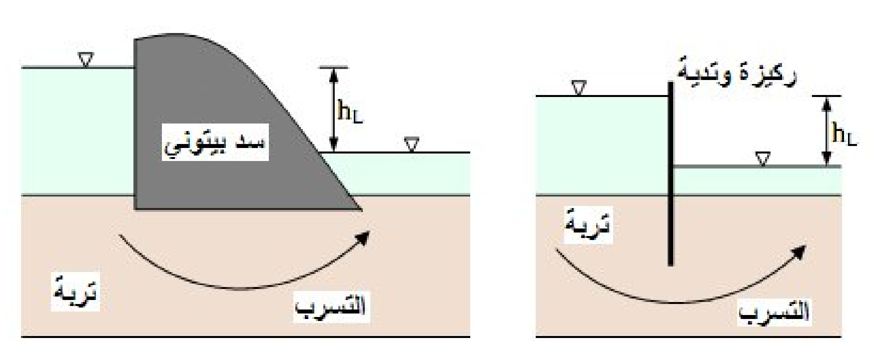


3- 1- مقدمة:
كما نعلم فإن التربة تحتوي على مسامات، وهذه المسامات تختلف في توزعها وحجمها وقطرها تبعاً لنوعية التربة وكثافتها. وغالباً ما تمتلئ هذه المسامات بالماء كلياً أو جزئياً بحسب تعرض التربة إلى الأمطار أو الجريانات أو التسرب أو الامتصاص أو غير ذلك. كما أن خواص التربة وخاصةً حدود أتربرغ التي تعبر عن مقاومتها تتأثر بماء المسام، حيث أن تغير كمية الماء يحول التربة من حالة السيولة إلى حالة الصلابة، فالتربة الغضارية مثلاً تتقلص بالجفاف وتصبح قاسية وقصيفة في حين أنها تنتفخ عندما تتعرض للرطوبة كما أنها تتلين وتتلدن. وكذلك فالترب الرملية المفككة تكتسب تماسكاً ظاهرياً عندما تتعرض للترطيب ويزول هذا التماسك إذا جفت التربة أو تعرضت للإشباع بالماء [10].

إن جريان الماء في التربة يتبع لخواص التربة وقابلية نفوذها، وتعرف قابلية النفوذ بأنها الخاصية التي تسمح للماء بالمرور ضمن التربة والجريان فيها. وبشكل عام فإن أي مادة يمكن أن تدعى مادة نفوذة إذا احتوت على فراغات، فالبيتون والرمل والغضار وغيرها من المواد كلها تعتبر مواد نفوذة ولكن بدرجات متفاوتة [10]، [26].

يسمى جريان الماء في التربة بالتسرب أو التدفق **(Seepage or Flow)**، ويحدث التسرب بسبب فرق منسوب الماء على جانبي المنشأة (سد، ركيزة وتدية، جدار استنادي، ...)، ومن الضروري تحديد مقدار التسرب أسفل هذه المنشآت حيث تصبح هنا نفاذية التربة هي العامل الأساسي لتحديد مقدار التسرب [43].

!!



!!

الشكل (3- 1): التسرب أسفل سد بيتوني - ركيزة وتدية [43]

في هيدروليك التربة لدينا في الغالب جريان دائم وهذا يعني أن سرعة الماء في كل نقطة من التربة تكون مستقلة عن الزمن وبهذا الشكل فإن جزيئات الماء تتبع مسار أو خط جريان غير متغير أو ثابت مع الزمن [26].

3- 2- أشكال وجود الماء في التربة:
يمكن تقسيم الماء الموجود في التربة بشكل عام إلى ثلاثة أقسام وهي [5]:

1. الماء الجوفي: وهو الماء الذي يتوزع تحت منسوب البساط المائي ويخضع في حركته لقانون دارسي.
2. الماء الثقالي: وهو الماء القادر على الجريان ضمن التربة تحت تأثير وزنه الذاتي ويستمر في الجريان إلى أن يصل إلى البساط المائي عندئذٍ يصبح ماء جوفياً.
3. الماء الممسوك: وهو الماء الذي لا يستطيع الجريان في التربة تحت تأثير وزنه الذاتي حيث يبقى معلقاً في التربة، إن قسماً من هذا الماء يشكل طبقة مدمصة ملتصقة بسطح حبات التربة تؤثر على خواص التربة كما أن قسماً آخر من الماء الممسوك هو الماء الموجود عند نقاط تماس الحبات الصلبة مع بعضها البعض بسبب خاصة الشد الشعري.



3- 3- مفاهيم وتعاريف أساسية:

3- 3- 1- مفهوم الضاغط الهيدروليكي:

يجري الماء ضمن التربة عند حصول فرق في الضاغط حيث يعتمد الضغط المائي في المسام حينئذٍ على المسار الذي تتبعه ذرات الماء أثناء جريانها. ويمثل الضاغط الهيدروليكي الكلي **(Total Head)** في نقطة ما من التربة مجموع ثلاثة أنواع من الضواغط، [10]، [30]، [33]، [43]، الشكل (3 - 2):

1. الضاغط المكاني **(Elevation Head)**: يمثل ارتفاع النقطة عن مستوي المقارنة المعتمد.
2. الضاغط المائي أو البيزومتري **(Pressure Head)**: يمثل ارتفاع الماء فوق تلك النقطة.
3. الضاغط الحركي **(Velocity Head)**: يمثل الضاغط الناتج عن السرعة ويتبع إلى مربع سرعة الجريان والثقالة الأرضية، وهو يوافق الطاقة الحركية بينما يوافق مجموع الضاغطين المكاني والمائي الطاقة الكامنة.

وقد أعطى برنولي علاقة شهيرة لحساب هذه الضواغط وهي:

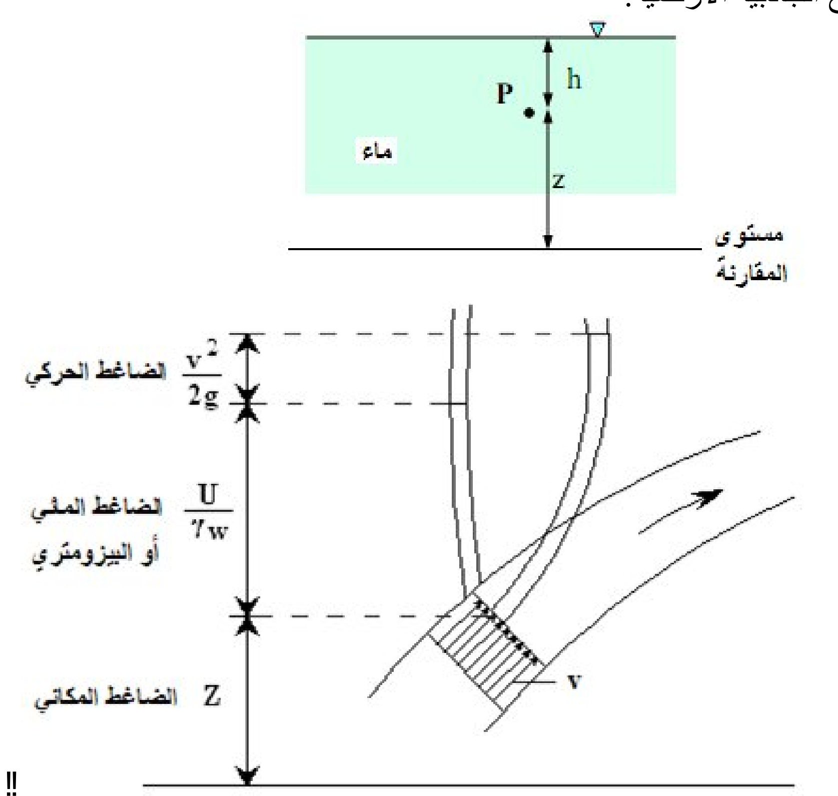
$$!!\ h = Z + \left(\frac{U}{\gamma w}\right) + \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

حيث: **Z**: الضاغط المكاني.

U: الضغط الهيدروستاتيكي في النقطة المعتبرة.

v: السرعة

g: تسارع الجاذبية الأرضية.



!!

الشكل (3- 2): الضاغط الهيدروليكي ممثلاً بثلاثة أنواع من الضواغط [43]

إن جريان الماء ضمن مسامات التربة يتم بسرعة صغيرة جداً لأن التربة تقاوم هذا الجريان بشدة نتيجة الاحتكاك الحاصل بين جزيئات الماء وحبات التربة من جهة ونتيجة لزوجة الماء من جهة!أخرى، ولذلك ُمعبر عن الضاغط الحركي نظراً لصغره مقارنة مع الضاغطين المكاني!

والبيزومتري، فمن أجل سرعة مقدارها $(v = 10\ cm / sec)$ وهي سرعة كبيرة لا نبلغها في الواقع فإن! قيمة الضاغط الحركي تساوي **(0.5 mm)** فقط وبالتالي فإن الضاغط الهيدروليكي الكلي في أي نقطة من التربة ما هو إلا عبارة عن مجموع الضاغطين المكاني والبيزومتري، وبالتالي تصبح معادلة برنولي المعبرة عن الجريان ضمن مسامات التربة كما يلي [10]، [33]، [43]:

$$h = Z + \left(\frac{U}{\gamma_w}\right)$$

3- 3- 2- سرعة الماء في التربة:

إن المسارات الحقيقية لخطوط جريان الماء في التربة تكون ملتوية ومتعرجة لذلك فإنه من غير الممكن تحديد السرعة الحقيقية للماء ولذلك سنحدد السرعة الوسطية [10]، [43].

ليكن **(dq)** تدفق الماء المناسب في أنبوب من التربة وذلك عبر سطح كلي **(ds)**، إن سرعة انخفاض الضاغط الهيدروليكي تساوي: $v = dq / ds$، ولإيجاد العلاقة بين سرعة انخفاض الضاغط التي هي سرعة وهمية والسرعة الحقيقية الوسطية **(v′)** نأخذ أسطوانة من التربة مقطعها **(S)** وارتفاعها **(H)** وعامل مساميتها **(n)** عندئذٍ يعطى حجم الفراغات بالعلاقة التالية [10]، [43]:

$$Sv \times H = n \times S \times H = n \times V$$

حيث أن: **S**: السطح الكلي للمقطع، **Sv**: السطح المشغول بواسطة الفراغات **(n × S)**.

وبما أن المياه تنساب فقط عبر المسامات المتصلة في التربة لذلك تكون السرعة الحقيقية الوسطية **(v′)** كما يلي:

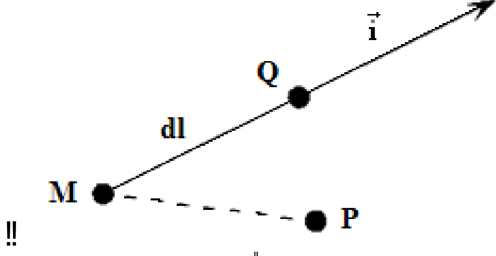
$$v' = \frac{dq}{n \times ds}$$

وبالتالي فإن: $v = n \times v'$

وفي الواقع فإن سرعة انخفاض الضاغط **(v)** هي السرعة المستخدمة في الحسابات، وهذا يتأكد لنا من خلال إهمال الطاقة الحركية في الجريان.

3- 3- 3- مفهوم الميل الهيدروليكي (الميل المائي):

إن الضاغط في نقطة مثل **M (x, y, z)** هو عبارة عن تابع **h (x, y, z)** لإحداثيات النقطة **M**، نسمي الشعاع $\vec{i}\left(\frac{-\partial h}{\partial x}, \frac{-\partial h}{\partial y}, \frac{-\partial h}{\partial z}\right)$ بالميل أو التدرج الهيدروليكي، [10]، [43]، الشكل (3 - 3).



الشكل (3 -3): مفهوم الميل الهيدروليكي [43]

إذا أخذنا نقطة **P** مجاورة تماماً للنقطة **M** نستطيع أن نكتب:

$$\vec{MP}(dx, dy, dz)$$

$$\vec{i}.\vec{MP} = -\frac{\partial h}{\partial x}dx - \frac{\partial h}{\partial y}dy - \frac{\partial h}{\partial z}dz$$

$$h_M - h_P = -dh = \vec{i}.\vec{MP}$$



في نقطة Q قريبة جداً من M وبنفس اتجاه! $\vec{i}(\frac{-\partial h}{\partial x},\frac{-\partial h}{\partial y},\frac{-\partial h}{\partial z})$!يمكن أن نكتب:

$$h_M - h_Q = -dh = \vec{i}.\vec{MQ} = |\vec{i}|.\vec{MQ}$$

وهكذا فإن قيمة! $\vec{i}(\frac{-\partial h}{\partial x},\frac{-\partial h}{\partial y},\frac{-\partial h}{\partial z})$!تكون:! $i = -\frac{dh}{dl}$!!

وعندما يكون الميل الهيدروليكي هو نفسه في أية نقطة من أجل جريان معين فإننا نقول أن هذا الجريان منتظم أو متماثل [10]، [43].

3- 4- النفاذية (Permeability):

تدعى المواد الحاوية على فراغات متصلة فيما بينها بالمواد النفوذة. وتعرف قابلية النفوذ بأنها الخاصة التي تمكن الماء من المرور ضمن مسامات التربة والجريان فيها. وبالتالي فإن عامل النفاذية يعطي مؤشراً عن سهولة جريان الماء ضمن المواد [13]، [26].

وتتميز جميع أنواع الترب والصخور بكونها تشكل مواد نفوذة غير أن نفاذيتها تختلف تبعاً لنسبة وحجم الفراغات الموجودة فيها. والماء الذي يجري ضمن فراغات التربة ذات الأبعاد الصغيرة يلاقي صعوبة كبيرة وبالتالي فإن التربة ذات نفاذية قليلة حتى لو كانت نسبة الفراغات كبيرة كما هو الحال في الغضاريات على سبيل المثال [26]، [43].

ويبين الجدول (3 - 1) قيم النفاذية ووصف التسرب لمختلف أنواع التربة لأخذ فكرة أولية عن طبيعة التسرب ضمن هذه الترب تبعاً للباحث (Terzaghi):

الجدول (3- 1): خواص النفاذية والتسرب لمختلف أنواع التربة (Terzaghi) [45]، [46]

Permeability (m/sec)	10^{0}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Drainage	**Good**						**Poor**		**Practically impervious**			
Soil Types	**Clean Gravel**		**Clean sands, clean sand & gravel mixtures**			**Very fine sands, organic & inorganic silts, mixtures of sand silt & clay, glacial till, stratified clay deposits, etc.**			**Impervious soils e.g., homogeneous clays below zone of weathering**			
					"impervious" soils modified by effects of vegetation & weathering							

3- 4- 1- أهمية دراسة نفاذية التربة:

يمكن تلخيص الأهمية العلمية لدراسة نفاذية التربة بشكل عام بالنقاط التالية [5]، [11]:

1. تحديد سرعة رشح وتصريف الماء عبر التربة (**seepage**).
2. تحديد ضغط الرشح (**seepage pressure**).
3. تفادي حدوث ظواهر خطيرة أو غير مستحبة مثل ظاهرة غليان الرمل (**Sand Boiling**) حيث يظهر الرمل وكأنه يغلي بسبب تجاوز قيمة الميل الهيدروليكي لقيمة الميل الهيدروليكي الحرج



(Critical Hydraulic Gradient) وتعرف هذه الظاهرة أيضاً باسم (Quick Sand)، أو ظواهر التعرية السطحية (Subsurface Erosion)، أو النحر (Piping) وغيرها.

4. يفيد عامل النفاذية في حساب مخزون المياه الجوفية.
5. حساب كمية المياه المفقودة (الضياعات) من مستودعات تخزين المياه (Storage Reservoirs).
6. يساعد عامل النفاذية في تصميم أنظمة التصريف حول أساسات المباني (Drainage System).

وغير ذلك من المجالات التطبيقية التي تعتمد أساساً على معرفة عامل نفاذية التربة.

3- 4- 2- قانون دارسي (Darcy Law):

ينتقل الماء الحر الشعري ضمن مسامات التربة بآلية خاضعة لقانون دارسي **(Darcy 1856)** [10]، [20]، [30]، [43]، وللحصول على علاقة أساسية لكمية التسرب عبر كتلة من التربة في حالة معينة سندرس الحالة المبينة في الشكل (3 - 4)، حيث أن مساحة المقطع العرضي للتربة تساوي **(A)** ومعدل التسرب **(q)** وكما رأينا سابقاً فإن الضاغط الكلي للجريان في أي مقطع من التربة يعطى بعلاقة برنولي:

$$h = Z + \left(\frac{U}{\gamma_w}\right) + \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

وبإهمال الضاغط الحركي (الناتج عن سرعة الجريان الصغيرة خلال التربة) يكون الضاغطان الكليان في المقطعين **(A, B)** على النحو التالي:

الضاغط الكلي عند المقطع **A**: $Z_A + UA$ ، الضاغط الكلي عند المقطع **B**: $Z_B + U_B$

حيث: Z_A، Z_B: هما الارتفاعان الجغرافيان للنقطتين عن مستوي مقارنة محدد.

U_A، U_B: هما الضاغط المائي أو البيزومتري عند النقطتين: **B, A**.

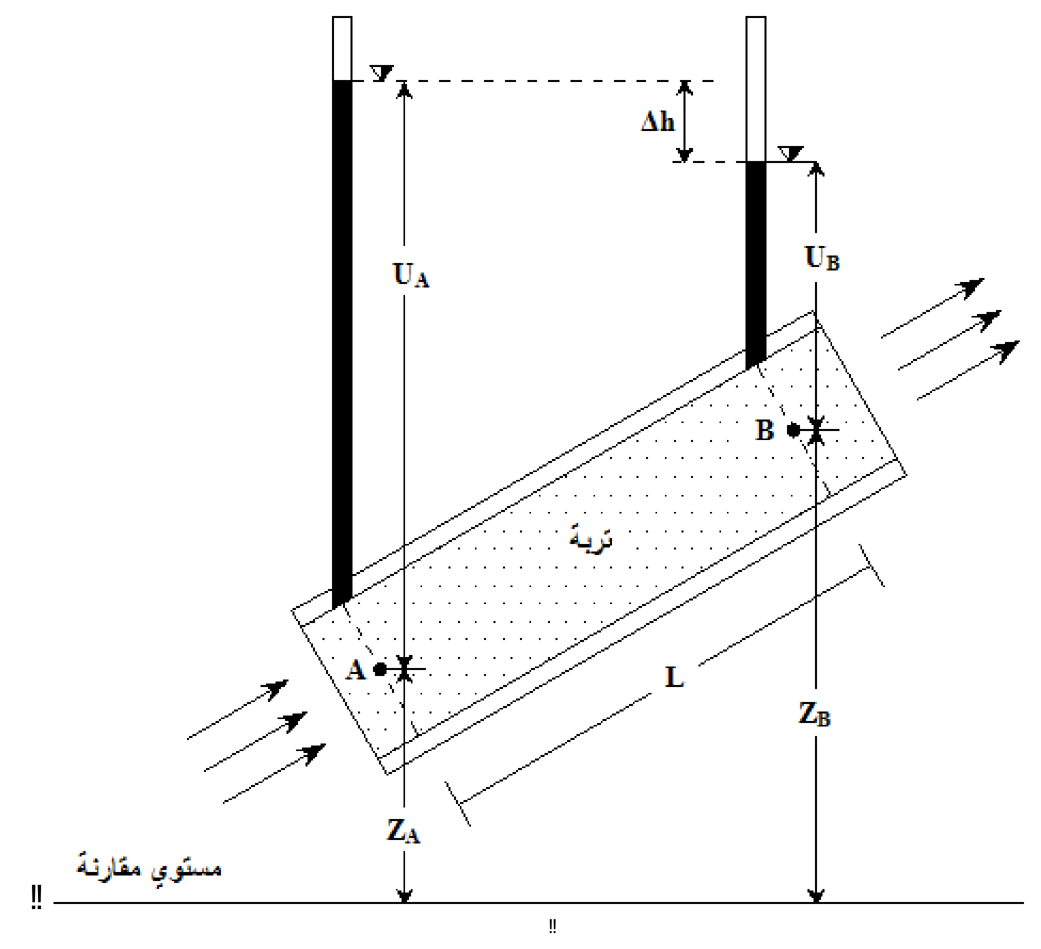
إن فرق الضاغط الهيدروليكي **(Δh)** بين المقطعين **(A, B)** هو:

$$\Delta h = (Z_A + U_A) - (Z_B + U_B)$$

ويمكن أن نكتب الميل الهيدروليكي كالتالي: $i = \frac{\Delta h}{L}$

حيث أن **(L)** هي المسافة بين المقطعين **(A, B)**.





!! 43@ ! ! Œ ! !œ! !! !!!4!! 3!!¾! !Œ

لقد أوجد دارسي علاقة بسيطة بين سرعة التسرب والميل الهيدروليكي من أجل الجريان وحيد الاتجاه حيث افترض وجود تناسب بين سرعة انخفاض الضاغط والميل الهيدروليكي كما يلي:

$$v = k \times i$$

حيث أن:

v: سرعة التسرب أو سرعة انخفاض الضاغط.

i: الميل الهيدروليكي.

k: عامل النفاذية.

وبذلك يكون معدل التسرب (q): $q = k \times i \times A$

حيث (A) هي المقطع العرضي للتربة العمودي على اتجاه الجريان.

إن عامل النفاذية (k) هو مقياس لمقاومة التربة لجريان الماء فيها، ويقاس بواحدات قياس السرعة نفسها **(cm/sec , mm/sec)**.

وبمعرفة خواص الماء التي تؤثر على الجريان يمكن أن نعبر عن عامل النفاذية بالعلاقة التالية:

$$k = \frac{K.\gamma_w}{\mu}$$

حيث أن:

K: عامل يرتبط بالوسط النفوذ فقط.



إن السرعة (v) تمثل سرعة التسرب المحسوبة على أساس المساحة الإجمالية للمقطع العرضي. وبما أن الماء يمكن أن يمر فقط خلال المسامات الموجودة بين حبات التربة فإن السرعة الحقيقية للتسرب عبر التربة (v') تعطى كما رأينا سابقاً بالعلاقة: $v' = \frac{dq}{n \times ds}$ حيث: n مسامية التربة.

وقد أعطيت بعض القيم النموذجية لعامل النفاذية في الجدول (3 - 2):

الجدول (3- 2): بعض القيم التقديرية لعامل النفاذية تبعاً لنوع التربة [10]

k (cm/sec)!! ƒ! œ̌!!Œ¾œ	!!œŒ
$10^{-1} < k < 10^{2}$	! š!
$10^{-3} < k < 10^{-1}$	¾œ
$10^{-7} < k < 10^{-3}$	! ƒ! œ! !¾œ!!! !ƒ!
$10^{-11} < k < 10^{-7}$	! ƒœœ!

إن عامل النفاذية يقاس عادةً عند درجة حرارة (20^oC)، أما عند أي درجة حرارة أخرى (T) فإن عامل النفاذية يمكن الحصول عليه بالعلاقة التالية:

$$\frac{k(20)}{k(T)} = \frac{(\rho_{20}) \times (\mu_T)}{(\rho_T) \times (\mu_{20})}$$

حيث أن:

$k(20), k(T)$: عوامل النفاذية عند درجات الحرارة $(20^oC, T^oC)$ على التوالي.

$\rho(20), \rho(T)$: الكثافة الكتلية للسائل عند درجات الحرارة $(20^oC, T^oC)$ على التوالي.

$\mu(20), \mu(T)$: عوامل اللزوجة عند درجات الحرارة $(20^oC, T^oC)$ على التوالي.

وبما أن النسبة $\frac{\rho_{20}}{\rho_T}$ تساوي تقريباً الواحد فيمكننا أن نكتب:

$$k(20) = \frac{k(T) \times (\mu_T)}{(\mu_{20})}$$

ويبين الجدول (3 - 3) قيم $\frac{\mu_T}{\mu_{20}}$ من أجل درجات الحرارة (T) المتغيرة بين $(10 - 30)^oC$:

الجدول (3- 3): عامل تصحيح عامل النفاذية تبعاً لتغير درجات الحرارة [10]

T^oC	μ_T / μ_{20}	T^oC	μ_T / μ_{20}	T^oC	μ_T / μ_{20}
10	1.298	17	1.078	24	0.908
11	1.263	18	1.051	25	0.887
12	1.228	19	1.025	26	0.867
13	1.195	20	1.000	27	0.847
14	1.165	21	0.975	28	0.829
15	1.135	22	0.952	29	0.811
16	1.106	23	0.930	30	0.793

... تعتمد النفاذية فقط على خصائص المادة المختبرة، ولكن أيضاً على طبيعة سائل ... **(Olson** [10]، [20]، وهناك تعبير آخر لقانون دارسي يأخذ بعين الاعتبار



سائل الجريان يقودنا إلى النفاذية المميزة (K) المرتبطة بخواص التربة والمستقلة عن السائل المستخدم ويعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$K = k .(\mu / \gamma)$$

حيث: μ: اللزوجة الديناميكية للسائل.
γ: الوزن الحجمي للسائل.

ونادراً ما تستخدم النفاذية المميزة (K) من أجل التعبير عن نتائج تجارب النفاذية التي نجريها في المخبر، لأن السائل المستخدم غالباً ما يكون الماء [10].

3- 4- 3- تعميم قانون دارسي:

3- 4- 3- 1- حالة وسط متجانس وموحد الخواص:

ينص قانون دارسي المعمم على أن شعاع سرعة انخفاض الضاغط وشعاع الميل الهيدروليكي متناسبان [10]، وبالتالي فإن:

$$\vec{v} = k \times \vec{i}$$

ففي كل نقطة من الوسط النفوذ يكون شعاع الميل الهيدروليكي مماساً لخط الجريان المار من هذه النقطة وهو متجه بنفس الاتجاه، ويكتب شعاع الميل الهيدروليكي بالشكل:

$$\vec{i} = \ \overrightarrow{grad}.h$$

وبالتالي فإن قانون دارسي يمكن كتابته بالشكل:

$$\vec{v} = -k.\overrightarrow{grad}.h = \overrightarrow{grad}.(-kh)$$

مما سبق يمكننا افتراض وجود كمون للسرعة (Φ) يساوي المقدار (kh -) وبالتالي فإن لسرعة انخفاض الضاغط عدة مركبات هي:

$$v_x = -k\frac{\partial h}{\partial x}, v_y = -k\frac{\partial h}{\partial y}, v_z = -k\frac{\partial h}{\partial z}$$

3- 4- 3- 2- حالة وسط متجانس غير موحد الخواص:

في هذه الحالة شعاع الميل الهيدروليكي وشعاع سرعة انخفاض الضاغط لا يبقيان متماسين ويستنتج الواحد من الآخر بعملية خطية [10].

ويكتب قانون دارسي في هذه الحالة بالشكل:

$$v = -\bar{k}.\overrightarrow{grad}.h$$

حيث أن $\bar{k}$ مصفوفة (تنسور) النفاذية.

كما أن مركبات السرعة تأخذ القيم التالية:

$$v_x = -k_x\frac{\partial h}{\partial x}, v_y = -k_y\frac{\partial h}{\partial y}, v_z = -k_z\frac{\partial h}{\partial z}$$

3- 4- 4- صلاحية قانون دارسي:

يطبق قانون دارسي في حالة الجريان الصفحي (المنتظم) فقط أي السرعات القليلة للجريان حيث يتم أخذ قوى الجاذبية بعين الاعتبار، وبما أنه لا يحدث أي جريان مضطرب في معظم أنواع الترب (الرمل - السيلت - الغضار) عدا البحص والرمل الخشن المنتظم التدرج، فقد أجريت دراسات عدة لتحديد مجال صلاحية قانون دارسي [10]، [20]، [21]. وقد أعطى موسكات (Muskat 1937) ملاحظات مهمة عن هذا الموضوع. كما وضع رينولدس معياراً لتحديد صلاحية قانون دارسي يسمى رقم رينولدس يعطى من أجل جريان الماء في التربة بالعلاقة [36]، [47]:

$$R_n = \frac{v.D.\rho}{\mu}$$

انخفاض الضاغط (cm/sec).



D: القطر الوسطي لحبات التربة **(cm)**.
ρ: الكتلة الحجمية للسائل **(gr/cm^3)**.
μ: معامل لزوجة السائل **(gr/cm.sec)**.

وقد بينت التجارب أن الجريان يكون صفحياً (منتظماً) إذا تحققت العلاقة:

$$R_n = \frac{v.D.\rho}{\mu} \leq 1$$

فإذا أخذنا تربة خشنة قطر حباتها الوسطي **(D = 0.45 mm)** وعامل نفاذيتها **(k = 0.203 cm/sec)** وبفرض أن **(i = 1)**، عندئذٍ تكون السرعة:

$$v = k \cdot i = 0.203 \text{ cm/sec}$$

ومن أجل **($\rho_{water} \approx 1$ gr/cm^3)** وكذلك **($\mu = 981 \times 10^{-5}$ gr/cm.sec)** عند درجة حرارة **20ºC**، نجد أن عدد رينولدس يساوي:

$$R_n = \frac{0.203 \times 0.045 \times 1}{981 \times 10^{-5}} = 0.931 < 1$$

لذلك نرى من الحسابات السابقة أن جريان الماء يعتبر منتظماً في أنواع التربة (الرمل - السيلت - الغضار) حيث يمكن تطبيق قانون دارسي [10]،[21]. ويمكن توقع حدوث جريان غير منتظم في الأتربة الرملية الخشنة والبحص والحصويات ويمكن إعطاء الميل الهيدروليكي فيها بالعلاقة التالية:

$$i = av + bv^2$$

حيث أن **a** و **b** ثوابت تجريبية تختلف حسب نوع التربة **(Forshemer 1902)** [20]،[47]. وقد لخص ليبس **(Leps 1973)** العوامل المؤثرة على سرعة الجريان عبر مسامات البحص النظيف والصخر. وتدل معظم الأبحاث على أن سرعة الرشح عبر مساماتها يمكن أن تعطى بالعلاقة التالية [20]،[26]:

$$U_v = C \cdot (R_H)^{0.5} \cdot i^{0.54}$$

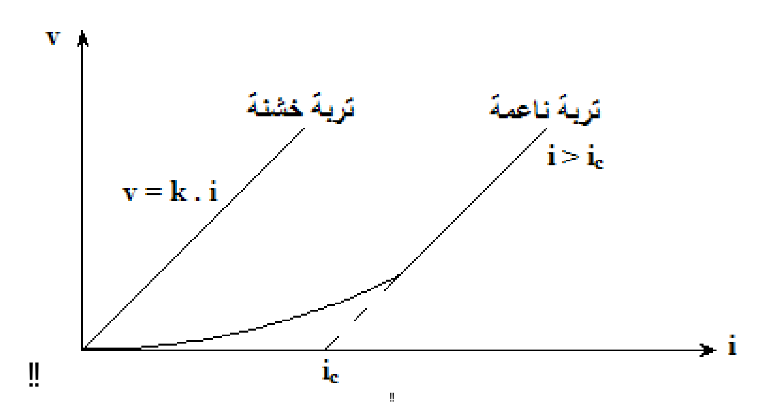
حيث:
U_v: السرعة الوسطية للجريان عبر المسامات.
C: ثابت يتبع شكل وخشونة حبات الصخر.
R_H: نصف القطر الهيدروليكي.
i: الميل الهيدروليكي الوسطي.

وقد أشار **(Hansbo 1960)** إلى أن تطبيق قانون دارسي يعطي أخطاء في حالة السرعات الضعيفة جداً بسبب انخفاض الضاغط الناتج عن الظواهر الغروية، وكذلك في حالة السرعات العالية جداً بسبب الدور الذي تلعبه قوى العطالة أثناء الحركة غير المنتظمة [20].

كما أوضح كل من الباحثين **(Robinet & Rhattas 1995)** أن التحديد التجريبي لمعاملات النفاذية في حالة الترب الناعمة ذات المسامية الضعيفة والمشبعة جزئياً يصبح صعباً بسبب التأثير المتبادل بين الماء وحبات التربة التي تخفض حركة الماء المسامي، كما أن الانحراف عن قانون دارسي لا يتم بشكل مفاجئ، بل يعتمد على قوى الارتباط بين الماء والطور الصلب، وضمن ظروف معينة يصبح الغضار أكثر مسامية وبالتالي أكثر نفاذية مع تزايد الميل الهيدروليكي [20]، [28]، [30].

من جهة أخرى هناك نتائج تجريبية للباحثين **(Olsen 1965, Tavenas 1983, Hillel 1988)** [10]، [20] تظهر أن قانون دارسي قابل للتطبيق على الجزء الأكبر من الأتربة الناعمة، فعندما يكون **($i < i_c$)** لا يمكن تطبيق قانون دارسي على الترب الناعمة في حين يمكن تطبيقه عندما يكون **($i > i_c$)** حيث **i_c** هو الميل الهيدروليكي الحرج، وهذا الانحراف عن قانون دارسي مبين في الشكل (3 - 5)، ويمثل بالعلاقة التالية:

$$V = k \cdot (i - i_c), \ (i > i_c)$$



!>10@!! d¢Œ!!!Œ !!!! !!! ! ! Œ! !!d¢! ! !! Œš!! Œ5!! 3!!¾! !Œ

3- 6- العوامل المؤثرة على عامل النفاذية:

1. **تأثير التركيب الحبي للتربة:** بينت التجارب أن التركيب الحبي يؤثر تأثيراً كبيراً على مقدار عامل النفاذية، حيث أن قيمة **(k)** في الترب الرملية أعلى بكثير منها في الترب الغضارية، وتنخفض قيمة **(k)** مع ازدياد نسبة المواد الناعمة في التربة، وقد بين **Hansen** أن قيمة عامل النفاذية تتناسب عكساً مع مربع قياس جزيئات التربة كما أعطى العلاقة التالية التي تقدر قيمة عامل النفاذية في حالة الرمل المنتظم [20]، [30]:

$$k = 100 \times D_{10}^2$$

حيث أن D_{10} القطر الفعال لحبات الرمل ويقدر بـ **cm**، ويقاس **k** بـ **cm/sec**.

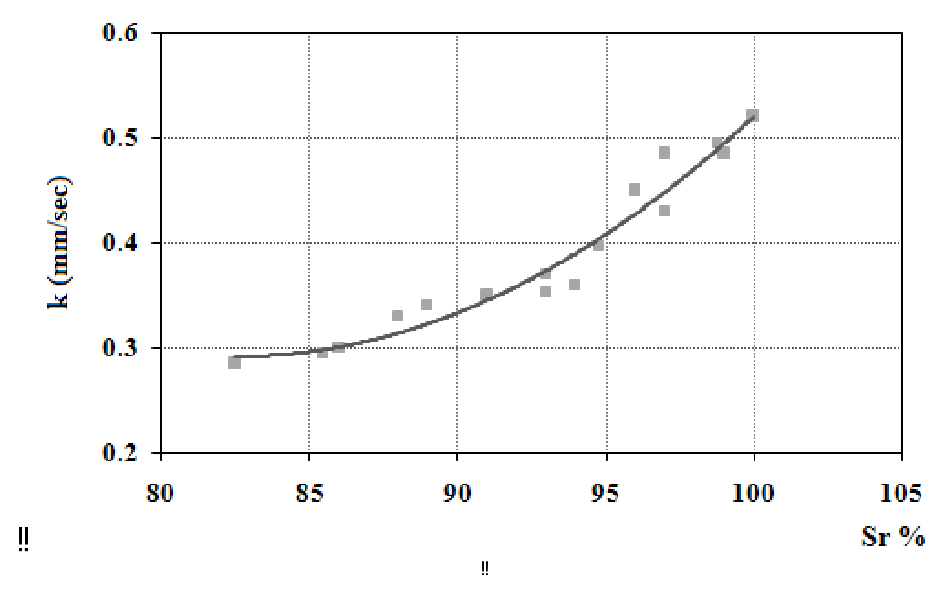
2. **دليل الفراغات:** تزداد قيمة عامل النفاذية بزيادة قيمة دليل الفراغات وهو نسبة حجم الفراغات إلى حجم المواد أو الحبيبات الصلبة في التربة، وهذا ما أثبتته التجارب التي أجريت على نوعين من الترب الرملية والغضارية التي تختلف في قيم دليل الفراغات [10]، [20]، [26].

3. **تأثير بنية التربة:** تؤثر البنية بمختلف أنواعها على نفاذية التربة للماء، وتدل قياسات عامل النفاذية التي أجريت على عينات سليمة البنية وأخرى مضطربة على أن النفاذية مختلفة ولو كان للعينة نفس الخواص الفيزيائية كما بين الباحث **Hansen** أن قيمة عامل النفاذية تزداد في الترب الناعمة ذات البنية المتندفة بالمقارنة مع الترب ذات البنية المشتتة [10]، [20]، [26].

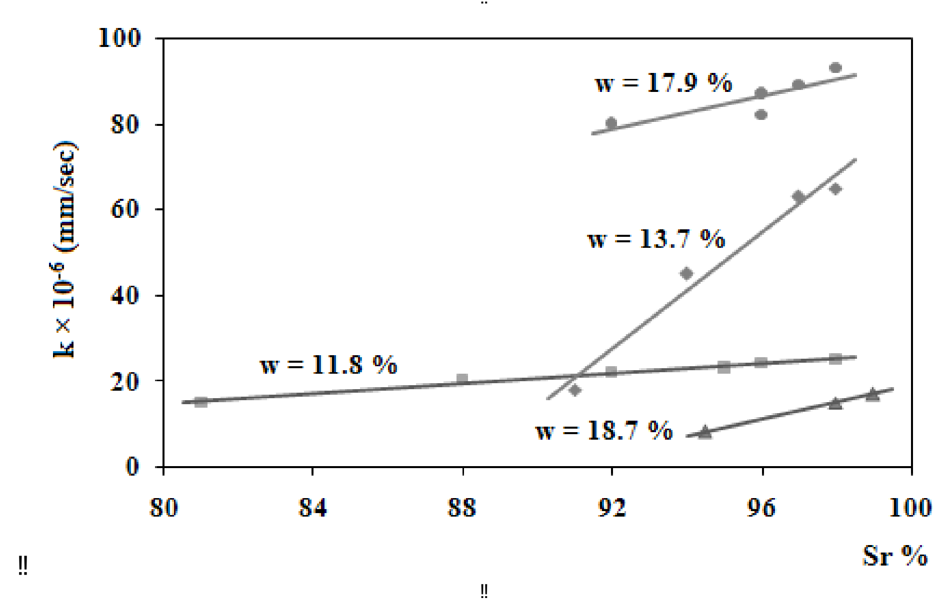
4. **تأثير درجة حرارة الماء والمواد المنحلة فيه والغازات:** عند ازدياد درجة الحرارة تنخفض لزوجة الماء مما يزيد من سرعة الرشح، من جهة أخرى فإن نوع الشوارد الموجودة في الماء يؤثر بشكل كبير على النفاذية فمثلاً تساعد شوارد الصوديوم على زيادة سماكة طبقة الماء المدمص حول الجزيئات لذلك تكون النفاذية في حالة وجود شوارد الصوديوم أقل منها بكثير في حال وجود شوارد البوتاسيوم أو الكالسيوم، كما يؤدي الغاز المحتبس في الماء أو التربة إلى نقصان عامل النفاذية فيها [10]، [20]، [35].

5. **تأثير درجة الإشباع:** تزداد قيمة عامل النفاذية بزيادة درجة الإشباع وتنخفض بانخفاضها، وتعرف درجة الإشباع بأنها نسبة امتلاء فراغات التربة بالماء أي تمثل النسبة بين حجم الماء إلى حجم الفراغات [20]، [37]. ويبين الشكل (3 - 8) علاقة عامل النفاذية **(k)** مع درجة الإشباع **(Sr %)** لرمل ماديسون، كما يوضح الشكل (3 - 9) تأثير درجة الإشباع على قيمة عامل النفاذية للغضار السيلتي، وقد تم إجراء التجارب المخبرية على عينات مرصوصة من الغضار السيلتي وزنها الحجمي الجاف **($1.69\ gr/cm^3$)** مع اختلاف الرطوبة الابتدائية عند الرص [10].





!!>10@Madison)!! !! ƒ!œ¾! !!! ƒ!œž!!Œ¾œ!! ƒ!!! !! !! œ ! Œ! !!!! ƒ!!!!8!! 3!!¾! !Œ



!!!>10@ !!ƒ !Œœ!!!!! ƒ!œž!!Œ¾œ!! ƒ!!! !! !! œ ! Œ! !!!! ƒ!!!!9!! 3!!¾! !Œ

6. **تأثير ضغط انتفاخ التربة:** لم نجد من خلال الدراسة المرجعية للمراجع ذات الصلة بموضوع البحث ما يشير إلى تأثير ضغط الانتفاخ على قيمة عامل النفاذية بشكل واضح، إلا أن بعض المراجع نوهت إلى أن زيادة قابلية التربة للانتفاخ تؤدي إلى تناقص نفاذيتها لأنه مع زيادة سماكة طبقة الماء الممصة حول الحبيبات ينقص حجم الفراغات التي يمكن للماء الحر الجريان عبرها وبالتالي تنخفض النفاذية بشكل كبير [20]، [36]، [43]، [44]، وستتم دراسة تأثير ضغط الانتفاخ على نفاذية الترب المدروسة في بحثنا لتحديد مقدار تأثير ضغط الانتفاخ على عامل النفاذية بشكل خاص باعتبار ضغط الانتفاخ المتحول الرئيسي المعبر عن السلوك الانتفاخي للتربة الغضارية.

3- 7- قياس عامل النفاذية:

تعتمد طريقة قياس عامل النفاذية على طبيعة التربة. وهناك عدة طرق لقياس قيمة هذا العامل منها ما يتم بالمخبر وتسمى طرق مخبرية ومنها ما يجري في الطبيعة وتسمى طرق حقلية نقوم بإجرائها للحصول على قيم واقعية وعملية.

3- 7- 1- الطرق المخبرية لقياس عامل النفاذية:

إن تحديد قيمة عامل النفاذية في المخبر لا تخلو من بعض السلبيات، ونذكر منها:

1. الاختبارات والقياسات المخبرية لا تعكس نفاذية التربة في الطبيعة بشكل دقيق.
2. الطرق المخبرية تقيس نفاذية التربة الشاقولية فقط دون تحديد النفاذية الأفقية للتربة.
3. قد تحدث أخطاء في القياسات التجريبية تؤدي إلى نتائج مخبرية غير دقيقة.
4. إن نتائج الطرق المخبرية تتأثر بعدة عوامل منها درجة الحرارة ودرجة إشباع العينة ونسبة الفراغات فيها.

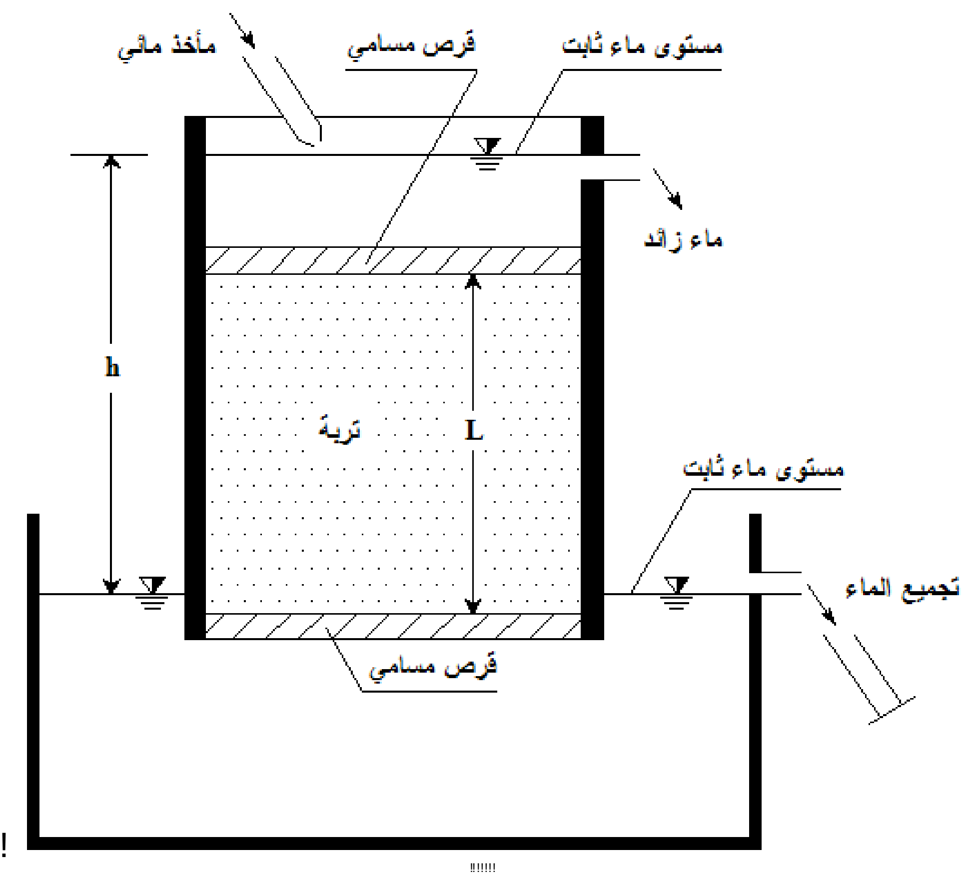
والطرق المخبرية الأكثر شيوعاً في تحديد قيمة عامل النفاذية هي كالتالي [11]، [20]:

1. قياس مباشر بواسطة تجربة النفاذية ذات الضاغط الثابت.
2. قياس مباشر بواسطة تجربة النفاذية ذات الضاغط المتغير.
3. قياس غير مباشر بواسطة تجربة الرشح الشعري الأفقي.
4. قياس غير مباشر من تجربة التشديد.

3- 7- 1- 1- تجربة النفاذية ذات الضاغط الثابت (Constant Head Soil Permeability Test):

المراجع القياسية لهذه التجربة هي: **BS , ASTM D - 2325** [11]، [48]، [49].

إن تجربة الضاغط الثابت مناسبة للترب الحبيبية المفككة العالية النفاذية كالحصى والرمل. يوضح الشكل (3 - 10) تجربة النفاذية ذات الضاغط الثابت حيث يتألف الجهاز المستخدم من مستودعين للماء منسوب الماء في كل منهما ثابت وبالتالي يوجد بينهما فرق ضاغط ثابت مقداره **h** ويتم الحفاظ عليه بضبط المأخذ المائي. توضع عينة التربة داخل علبة أسطوانية حيث ينتقل الماء من هذه العلبة إلى الوعاء السفلي وذلك عبر العينة ومن ثم إلى وعاء تجميع الماء المار في التربة ذات الطول **L** والمقطع **A** الموضوعة بين قرصين مساميين لهما قابلية نفوذ كبيرة جداً والغاية منهما توزيع ضغط الماء بشكل منتظم على أسفل العينة وأعلاها ومنع جرف التربة.



!!›11@ !œ¢Œ! œe!Œ Œ! ƒ!œ̆!Œ!! !!!!!10!! 3!!¾! !Œ

إن كمية الماء المار **Q** خلال زمن **t** بالاستناد إلى قانون دارسي تعطى بالعلاقة:

$$Q = q \times t = k \times i \times A \times t$$

حيث: **A**: مساحة المقطع العرضي لعينة التربة المدروسة.

i: الميل الهيدروليكي الذي تبقى قيمته ثابتة خلال التجربة وتساوي: $i = h / L$

وبالتالي تصبح العلاقة السابقة كما يلي:

$$Q = k \times (h / L) \times A \times t$$

ومنه تكون قيمة عامل النفاذية:

$$k = \frac{Q \times L}{h \times A \times t}$$

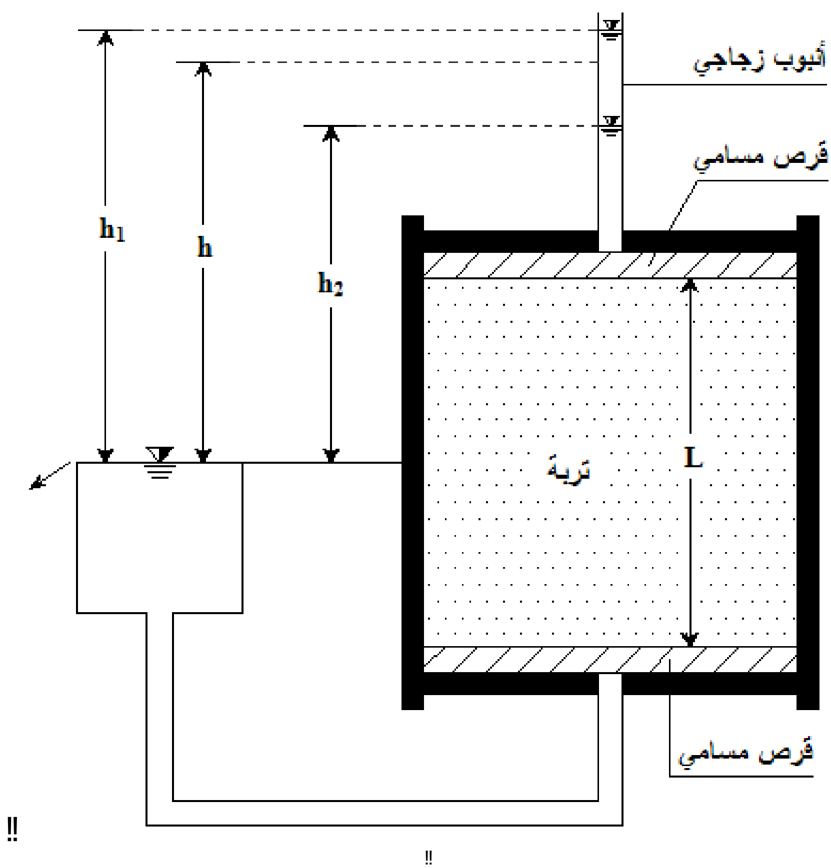
وبالتالي يمكن من خلال هذه التجربة قياس كمية الماء **Q** المارة في العينة والمتجمعة في وعاء التجميع خلال فترة زمنية **t**. ومنه يمكن حساب عامل النفاذية **k** من العلاقة السابقة بمعرفة قيمة الضاغط الثابت **h**. ويجب إجراء عدة تجارب جريان لعينات مختلفة من التربة ويؤخذ متوسط القيم الناتجة لعامل النفاذية، كما ينبغي تفريغ الهواء من العينة قبل التجربة واستخدام ماء خالي من الهواء.

3-7-1-2- تجربة النفاذية ذات الضاغط المتغير (Falling Head Soil Permeability Test):

المراجع القياسية لهذه التجربة هي: **BS , ASTM D - 2434** [11]، [48]، [49].

نلجأ إلى هذه التجربة من أجل قياس عامل النفاذية في الترب ذات الحبات الناعمة كالغضار أو الترب ...ون كمية الماء التي تجري ضمن العينة قليلة نسبياً.

لهذه الغاية نستخدم جهاز قياس النفاذية المبين في الشكل (3 - 11)، ويتألف من وعاء توضع فيه العينة بين قرصين مساميين لهما قابلية نفوذ كبيرة ويتصل هذا الوعاء من الأعلى بأنبوب زجاجي صغير القطر بحيث يجري الماء من الأنبوب عبر العينة ويسجل الارتفاع الأولي للماء في اللحظة $(t = 0)$، أي قبل التجربة وليكن هذا الارتفاع h_1، وبعد السماح للماء بالجريان خلال التربة يصبح فرق الارتفاع النهائي عند اللحظة $(t = t)$، وليكن هذا الارتفاع h_2.



!!>11@ƒ!!!Œ! œ!Œ Œ! ƒ!œ!Œ!!! !!!11!! 3!!¾! !Œ

إن كمية الماء المارة ضمن عينة التربة هي:

$$q = k \times i \times A = k \times (\frac{h}{L}) \times A = -a \times \frac{dh}{dt}$$

حيث:

h: فرق الارتفاع في أي وقت.
A: مساحة مقطع العينة.
a: مساحة مقطع الأنبوب الصغير.
L: طول العينة.

وتدل الإشارة السالبة على تناقص ارتفاع الماء، وبإصلاح العلاقة السابقة نجد:

$$-\frac{dh}{h} = k \times (\frac{A}{L \times a}) \times dt$$

وبمكاملة الطرفين نحصل على مقدار الهبوط أو التناقص في قيمة الضاغط المائي من h_1 إلى h_2 خلال فترة زمنية t.

$$\int_{h_1}^{h_2} -\frac{dh}{h} = \int_0^t k \times (\frac{A}{L \times a}) \times dt$$

وبإجراء المكاملة نحصل على العلاقة التي تمكننا من حساب عامل نفاذية التربة:

$$\mathbf{k = 2.303 \times [\ \frac{a \times L}{A \times t}\ ] \times \log_{10}(\frac{h_1}{h_2})}$$

يتم تحديد كل من قيم **(h_1, h_2, a, A, L)** من التجربة وعندئذٍ يتم حساب عامل النفاذية للتربة المدروسة من العلاقة السابقة.

3- 7- 1- 3- قياس عامل النفاذية من تجربة التشديد:

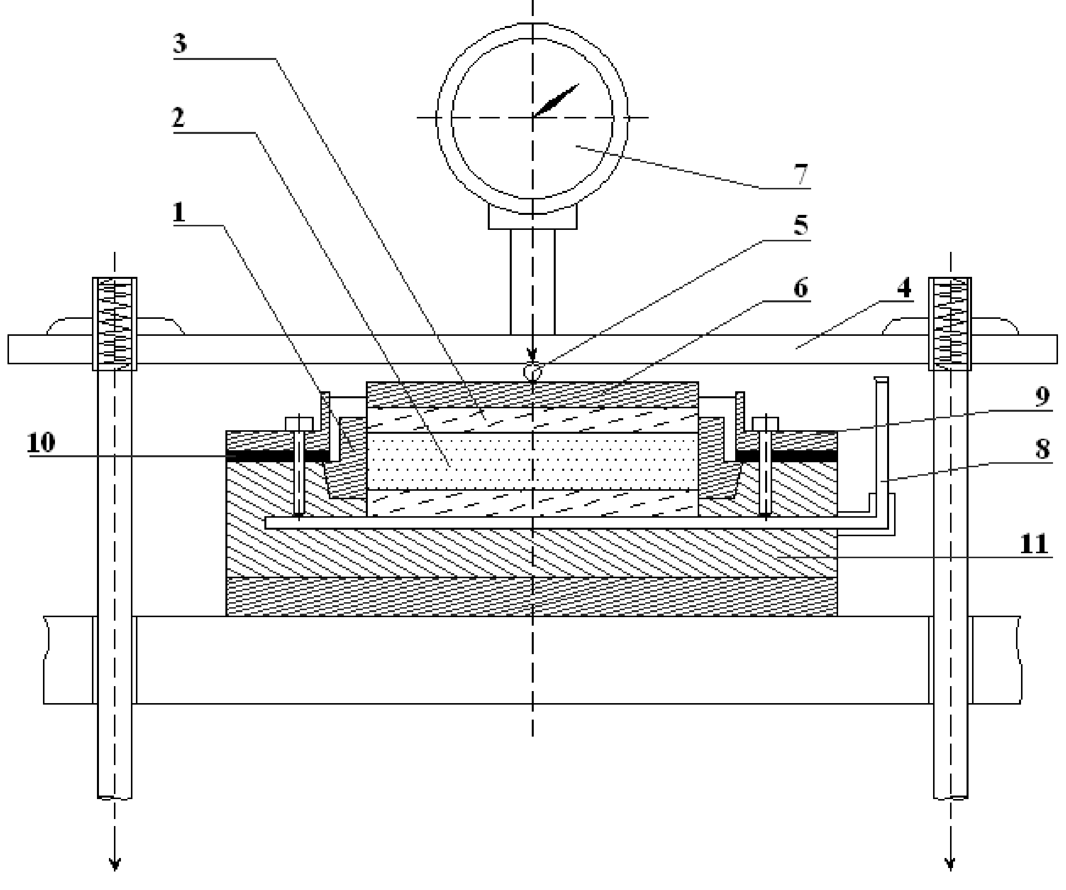
تقوم نظرية التشديد تبعاً لترزاكي **(Terzaghi's Theory of Consolidation)** [45]، [46]، [47]، على الافتراضات التالية:

- إن العينة مشبعة ومتجانسة تماماً.
- جزيئات الماء وكذلك حبات التربة غير قابلة للانضغاط.
- قانون دارسي لجريان الماء خلال التربة صالح للتطبيق.
- عامل نفاذية التربة يبقى ثابتاً خلال عملية التشديد.
- التغير الحجمي المقابل للتغير في نسبة الفراغات يظل ثابتاً.

ويحدد عامل نفاذية الترب الغضارية غالباً بواسطة تجربة التشديد وحيد الاتجاه (جهاز الآدومتر) المبين في الشكل (3 - 12)، ويتكون جهاز الآدومتر من [47]:

1! حلقة معدنية توضع داخلها عينة التربة.
2! عينة التربة المدروسة والتي يمكن أن تكون مخربة أو سليمة حسب الحالة المدروسة.
3! قرصين مساميين يوضعان أعلى العينة وأسفلها للسماح بمرور الماء من العينة وإليها.
4! ذراع التحميل.
5! ركيزة كروية لنقل الحمولة من ذراع التحميل إلى القرص المعدني.
6! القرص المعدني الذي ينقل إجهاداً منتظماً للعينة.
7! مؤشر لقياس تغير ارتفاع العينة مع الزمن.
8! أنبوب بيزومتري.
9! حلقة نحاسية مليئة بالماء في الأعلى توضع محيطة بالقرص المسامي العلوي لحماية العينة من الجفاف بالتبخر طيلة فترة التجربة.
10! جوان مطاطي أو أي مادة أخرى مانعة للتسرب.
11! القاعدة السفلية لحلقة التشديد.





!!>47@œ! Œƒš! !! !!!!! ŒEœ !!!12!! 3!!¾! !Œ

!!

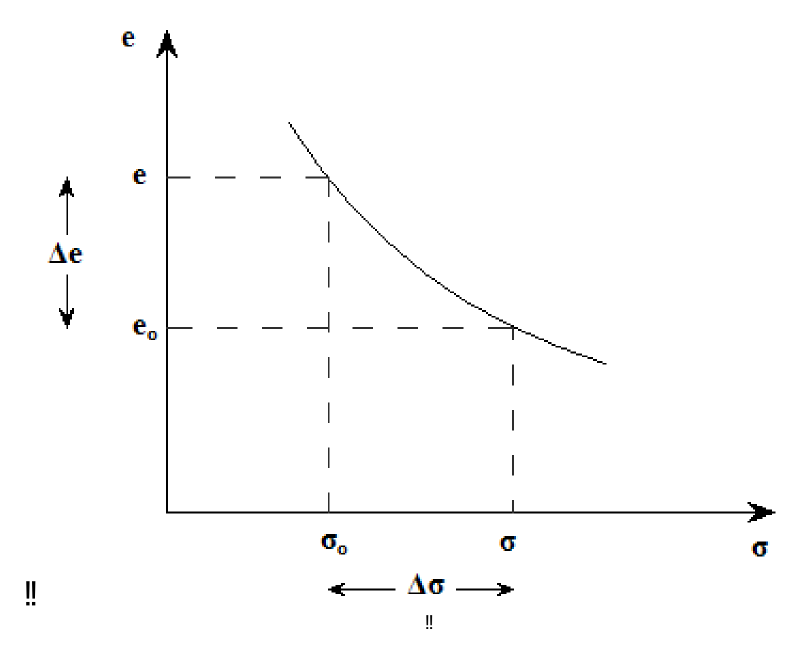
نقوم بإجراء تجربة التشديد وحيد الاتجاه وفق الخطوات التالية:

1. يتم تجهيز العينة ووضعها ضمن حلقة التشديد بين القرصين المساميين العلوي والسفلي للسماح للماء بالمرور من العينة وإليها.
2. نغمر العينة بالماء وننتظر فترة من الزمن للتأكد من إمكانية انتفاخ العينة أو عدم انتفاخها، وذلك من خلال مراقبة مؤشر التشوهات ففي حال دوران المؤشر عكس عقارب الساعة فهذا يدل على حدوث انتفاخ في العينة (قراءات سالبة للتشوه) وعندها ننتظر الزمن الكافي لاستقرار الانتفاخ ثم نبدأ بتطبيق الحمولات على العينة، وفي حال عدم انتفاخ العينة نبدأ بالتحميل مباشرةً حيث يبدأ انضغاط (هبوط) العينة ويتحرك المؤشر مع عقارب الساعة (قراءات موجبة للتشوه).
3. عند كل حمولة يتم تطبيقها على العينة تؤخذ قراءات التشوه (الهبوط أو الانتفاخ) الذي يحدث وذلك خلال فترات زمنية تختلف حسب نوع التربة والغاية من الدراسة، وتكون هذه الفترات عادةً كما يلي: من بداية التحميل حتى **(30 sec)** ثم **(30 - 25 - 20 - 15 - 13 - 10 - 8 - 4 - 2 - 1)** دقيقة، ثم **(1 - 2 - 4 - 8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 18 - 20 - 22 - 24)** ساعة.
4. نستمر بالتحميل حتى استقرار الهبوط (أي عند ثبات القراءات) وبالتالي تكون العينة قد وصلت إلى وضع التوازن، أي تكون عملية التشديد قد انتهت تحت تأثير الحمولة المطبقة وبمعنى آخر أنه تم طرد ماء المسام الزائد كاملاً وتلاشى الضغط الناشئ عنه.
5. نطبق سلسلة من الحمولات على العينة وتكون عادةً كل حمولة ضعف الحمولة التي سبقتها.
6. ... مولة القياسات التي تمت للحمولة الأولى نفسها وتترك الفترة الزمنية نفسها.

7. بعد الانتهاء من وضع الحمولات (انتهاء التحميل بالحمولة العظمى) نقوم برفع الحمولات بالتدريج وعلى مراحل كما في التحميل، وعند نهاية التجربة نقوم برفع العينة وقياس رطوبتها النهائية ووزنها الجاف.

ولتحليل نتائج التجربة يتم عادةً تمثيل النتائج بمنحنيين [46]، [47]:

1. المنحني الأول: منحني التشديد الذي يمثل العلاقة بين الزمن والهبوط.
2. المنحني الثاني: منحني الانضغاطية الذي يمثل العلاقة بين الضغط الفعال المطبق على العينة ونسبة الفراغ في نهاية كل مرحلة من مراحل التحميل والتفريغ، الشكل (3 - 13).



!!>47@ /! de !! Œ!š!! !!!13!! 3!!¾! !Œ

ويتم تعيين نسبة الفراغات عند نهاية أي مرحلة وفق طريقتين [10]، [47]:

- **إيجاد نسبة الفراغات بطريقة الوزن الجاف:** تعد هذه الطريقة من الطرق المفضلة وهي ممكنة التطبيق لكلا العينات المشبعة والمشبعة جزئياً، فإذا فرضنا أن M_S الكتلة الجافة للعينة في نهاية التجربة وأن A مساحة مقطع العينة، G_S الوزن النوعي للتربة. تكون السماكة المكافئة للتربة الصلبة H_S تعطى بالعلاقة:

$$H_S = \frac{M_S}{G_S \times A \times \rho_W}$$

وتعطى نسبة الفراغات e_i في نهاية فترة زيادة الحمولة بالعلاقة:

$$e_i = \frac{H_i - H_S}{H_S}$$

H_i: ارتفاع العينة في وضع التوازن لمرحلة التحميل المدروسة. ويعطى تحت تأثير ضغط معين بالعلاقة التالية:

$$H_i = H_o \pm \sum \Delta H$$

في بداية التجربة.



ΣΔH: مجموع التغيرات في ارتفاع العينة حتى نهاية المرحلة المدروسة.

- **إيجاد نسبة الفراغات بطريقة محتوى الرطوبة النهائي:** تستخدم هذه الطريقة في العينات المشبعة كلياً، فإذا كانت W_f محتوى الرطوبة عند نهاية التجربة، فإن نسبة الفراغات في نهاية التجربة e_f تعطى بالعلاقة التالية:

$$e_f = W_f . G_S$$

أما في العينة المطوقة جانبياً (عديمة التوسع جانبياً) حيث يكون الارتفاع **H** يتناسب مع المقدار **(1 + e)** يمكننا أن نكتب:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e}$$

وبالتالي تغير نسبة الفراغات تعطى بالعلاقة:

$$\Delta e = \frac{1+e_f}{H_f} . \Delta H$$

ويمكن من خلال تجربة التشديد تعيين معاملات الانضغاط التي تعتبر مؤشرات هامة تعبر عن سلوك التربة والتغيرات الحجمية التي تطرأ عليها أثناء تعرضها لضغط خارجي، وهذه المعاملات هي [10]، [46]، [47]:

1. معامل قابلية الانضغاط a_v **(coefficient of compressibility)**: وهو عبارة عن النقصان في نسبة الفراغ منسوباً إلى تغير الضغط الخارجي.
2. معامل الانضغاط الحجمي m_v **(coefficient of volume compressibility)**: وهو عبارة عن التغير الحجمي لواحدة الحجوم منسوبة إلى التغير في الضغط الخارجي.
3. دليل الانضغاط c_c **(compression index)**: وهو عبارة عن التغير في نسبة الفراغ منسوباً إلى التغير في لوغاريتم الضغط الخارجي المطبق، وفي حالة الانتفاخ يكون دليل الانتفاخ (وبشكل مشابه لدليل الانضغاط) يساوي إلى التغير في نسبة الفراغ (زيادة) منسوباً إلى التغير في لوغاريتم الضغط الخارجي (تناقص الضغط).

ويمكن استنتاج قيم المعاملات السابقة اعتماداً على نتائج تجربة التشديد كما يلي:

1. معامل قابلية الانضغاط a_v: عند حدوث زيادة جزئية في الضغط الفعال المطبق قدرها **Δσ** فإنه يحدث تغير في نسبة الفراغات قدره **Δe** حيث:

$$\Delta e = e_f - e_o$$

e_f، e_o: نسب الفراغات عند بداية ونهاية التشديد تحت تأثير الضغط الإضافي.

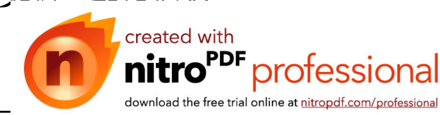
$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} = \frac{e_o - e_f}{\Delta \sigma}$$

والإشارة السالبة تشير إلى أن نسبة الفراغات تتناقص مع زيادة الضغط **σ** أي أن التناسب عكسي بينهما. وتقدر قيمة a_v بالواحدات الدولية بـ m^2/KN (أي مقلوب واحدة الإجهاد).

2. معامل الانضغاط الحجمي m_v: ويعرف بأنه التغير في واحدة الحجم عند زيادة واحدة في الضغط ويعطى بدلالة نسبة الفراغات بالعلاقة التالية:

$$m_v = \frac{e_f - e_o}{1+e_o} \times \frac{1}{\sigma_f - \sigma_o} = \frac{\Delta e}{1+e_o} \times \frac{1}{\Delta \sigma} = \frac{a_v}{1+e_o}$$

كما أنه يعطى بالعلاقة:



$$m_v = \frac{\Delta V / V}{\Delta\sigma} = \frac{\Delta H / H}{\Delta\sigma} ; \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e} \Rightarrow m_v = \frac{e_f - e_o}{1+e} \times \frac{1}{\sigma_f - \sigma_o}$$

ويمكن التعبير عن قيمة Δe بالشكل: $\Delta e = \frac{\Delta H}{H_0}(1+e_0)$

وبالتالي: $m_v = \frac{\Delta H}{H_0} \times \frac{1}{\Delta\sigma}$

حيث: ΔH: التغير في ارتفاع العينة المشددة.

H_0: ارتفاع العينة البدائي.

إن واحدات m_v هي نفس واحدات a_v أي مقلوب واحدة الإجهاد، ويبين الجدول (3 - 4) قيم معامل الانضغاط الحجمي لبعض أنواع التربة:

الجدول (3- 4): قيم معامل الانضغاط الحجمي لبعض الترب تبعاً لقابليتها للانضغاط [47]

M_v (cm²/kg)	!!! !!Œ!!
> 0.1	Œ!! ƒde! ƒ de !Œ Œ! !!!
0.1 - 0.02	! ƒde! ƒ de !Œ Œ! !!!
0.02 - 0.005	!!! !!!!! ƒ de !Œ Œ! !!!
0.005 - 0.002	!! Ž! !!!! ƒ de !Œ Œ! !!!
< 0.002	Œ!!! Ž! !!!! ƒ de !Œ Œ! !!!

3. دليل الانضغاط c_c: هو ميل الجزء الخطي (المستقيم) من مخطط العلاقة بين نسبة الفراغات ولوغاريتم الضغط الفعال المطبق، أي أنه عبارة عن ثابت بدون أبعاد.

وهكذا من أجل أي نقطتين على القسم المستقيم من المنحني يمكن إيجاد قيمة c_c بالعلاقة:

$$c_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_o - e_f}{\log(\sigma_f / \sigma_o)}$$

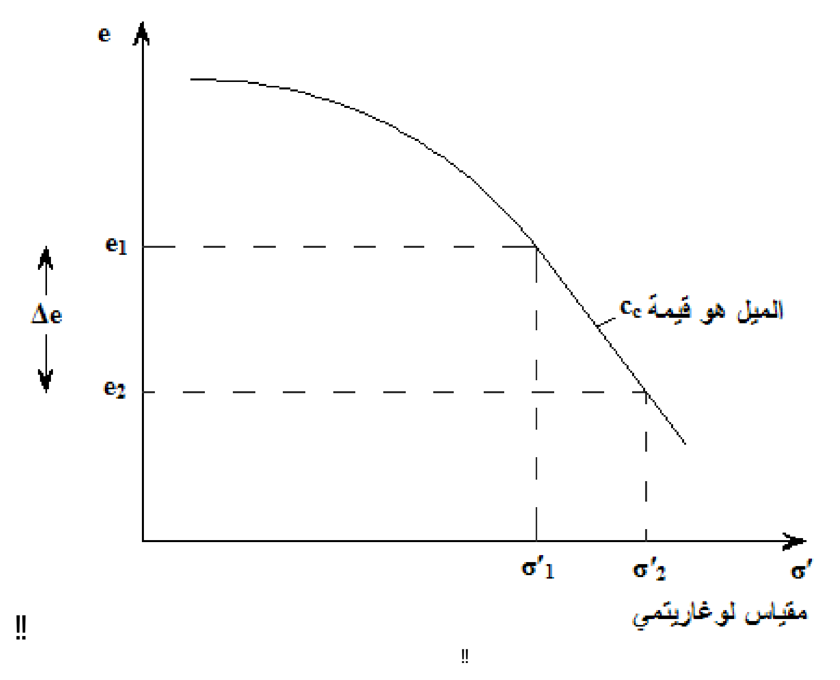
ومنه يمكن استنتاج نسبة الفراغات النهائية e_f:

$$e_f = e_o - c_c \times \log[(\sigma_o - \Delta\sigma) / \sigma_o]$$

يبين الشكل (3 - 14) كيفية إيجاد قيمة c_c، وعلى الرغم من أن العلاقة $(\log \sigma', e)$ هي الطريقة الشائعة لتمثيل منحني الانضغاطية إلا أن التشوه الشاقولي يكون أكثر فاعلية من نسبة الفراغات في إظهار نتائج تجربة التشديد وحيد الاتجاه ويعتمد التشوه على الارتفاع الأصلي للعينة H_0 وتغير ارتفاعها أثناء مراحل التحميل ΔH، وعليه فإن التغير النسبي في الارتفاع ε يعطى بالعلاقة:

$$\varepsilon = \Delta H / H_0$$





!!!47@cc!! ƒ! ce !! Œƒ!!!ceƒ!!!!ƒ!!!!(log σ′, e)!!!! !!Œ!š!!!!!14!! 3!!¾! !Œ

وبتمثيل العلاقة (log Δσ, ε) فإن ميل الجزء المستقيم من منحني الانضغاطية يسمى دليل الانضغاطية المعدل $c_{c\varepsilon}$ ، وذلك اعتماداً على أبحاث هولتز وكوفاكس 1981، ويعبر عن دليل الانضغاطية المعدل بالعلاقة:

$$c_{c\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta \log \sigma} = \frac{\Delta H / H_o}{\log(\sigma_f / \sigma_o)}$$

أحياناً يسمى دليل الانضغاطية المعدل $c_{c\varepsilon}$ بنسبة الانضغاط، وتعطى العلاقة بينه وبين دليل الانضغاطية c_c كما يلي:

$$c_{c\varepsilon} = \frac{c_c}{1 + e_o}$$

وهناك علاقات تجريبية تربط بين دليل الانضغاطية c_c وبعض الخواص الفيزيائية للتربة كحد السيولة وقد أعطى كل من الباحثين ترزاكي وبك 1967 هذه العلاقة للترب المتماسكة المشددة طبيعياً والمتوسطة الحساسية كما يلي:

$$c_c = 0.009(W_L - 10)$$

كما أعطى الباحث سكيمبتون علاقة تجريبية لتحديد علاقة حد السيولة بدليل الانضغاطية للترب المخربة كما يلي:

$$c_c = 0.007(W_L - 10)$$

تعيين معامل التشديد الشاقولي C_V (coefficient of vertical consolidation):

إن معامل التشديد يعطي الباحث فكرة عن تأثير خواص التربة (الانضغاطية - النفاذية) على الزمن اللازم لحدوث نسبة تشديد معينة. ويتم تحديد قيمة هذا المعامل بطرق عدة، منها ما يعتمد على المقارنة بين المنحني النظري للتشديد والمنحني التجريبي كطريقتي تايلور وكاساغراندي، وهناك طرق أخرى نذكر منها أوزاكا، سيفارام وسوامي [10]، [46]، [47].



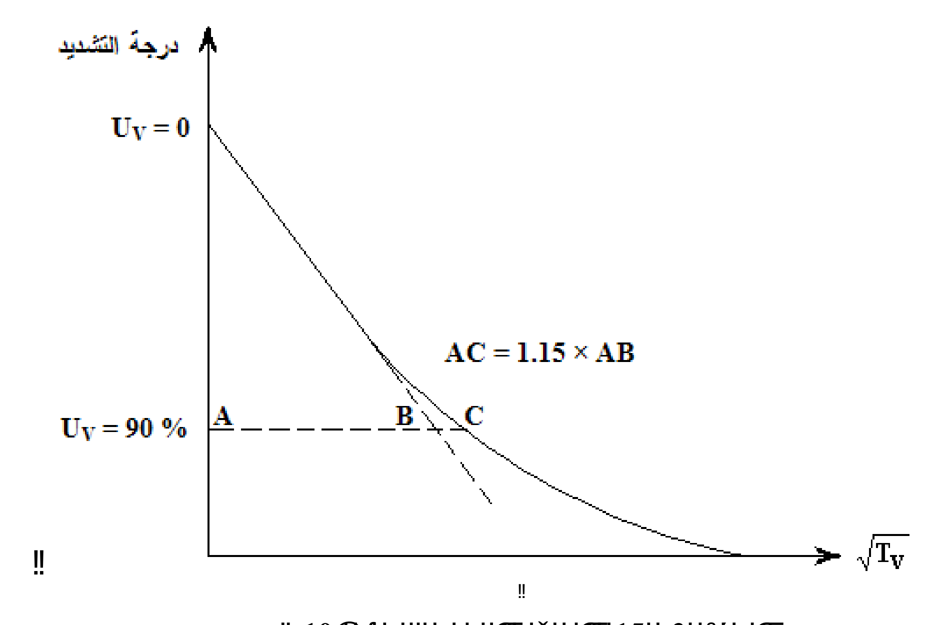
1. طريقة جذر الزمن لتايلور:

إن المنحني النظري الممثل للعلاقة بين درجة التشديد **U** والجذر التربيعي لعامل الزمن $\sqrt{T_V}$ موضح بالشكل (3 - 15)، وهذا المنحني يبقى نظرياً حتى النقطة الموافقة لدرجة تشديد **U = 60 %**، ونلاحظ عند النقطة الموافقة لدرجة تشديد **U = 90 %** أن المسافة **AC** تساوي **1.15** من المسافة **AB** حيث **B** هي نقطة تقاطع ممدد الجزء الخطي من المنحني النظري مع الخط **AC**، ونستفيد من هذه الخاصية في تعيين النقطة الموافقة لدرجة تشديد **U = 90 %** على المنحني التجريبي.

من أجل المنحني التجريبي يتم التعبير عن درجة التشديد بمقدار الانضغاط بعد فترة معينة من الزمن، أي بمقدار الهبوط المسجل على المؤشر في تجربة التشديد.

يتم أخذ القراءات **(mm)** في الأزمان التالية مقدرةً بالدقيقة **(min)**:

(0 - 0.083 - 0.167 - 0.333 - 0.5 - 1 - 2 - 3 - 5 - 7 - 10 - 13 - 15 - 20 - 30 - 40 - 60 - 120 - 240 - 300 - 480 - 1440 - 1920)



!!

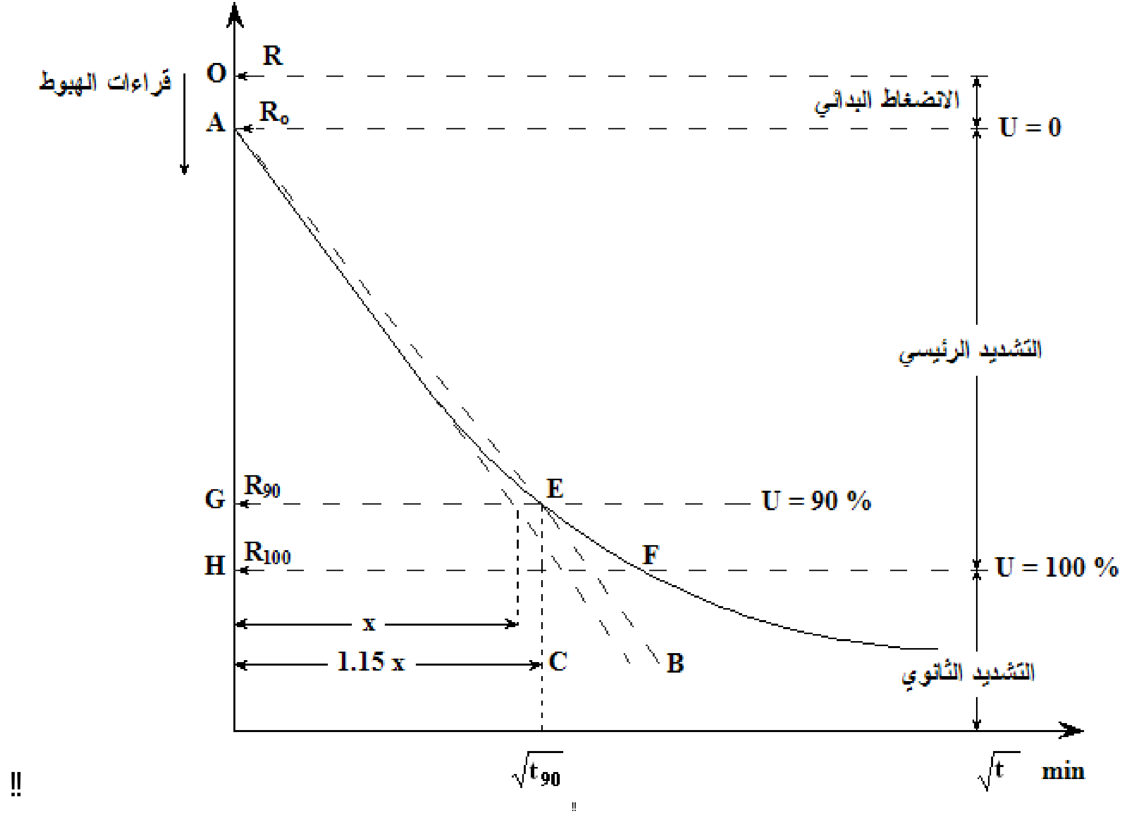
!!

!!ﺇ10@ﻔ!! !!!!! !! !!Œ!š!!Œ15!! 3!!¾! !Œ

!!

وبالتالي نحصل على المنحني التجريبي للتشديد الموضح بالشكل (3 - 16):





!!>10@ƒ!! !!!!! !ƒ! ! !!Œ !š!! !Œ16!! 3!!¾! !Œ

نلاحظ من المنحني أنه يمكن أن نقسم التشديد إلى ثلاثة مراحل كما يلي:
1. الانضغاط البدائي.
2. التشديد الرئيسي.
3. التشديد الثانوي.

هذه المراحل متداخلة فيما بينها، إلا أن المرحلتين الثانية والثالثة تتعلقان بالزمن حيث يتقدم التشديد الرئيسي والثانوي مع الزمن.

إن القسم الأول من المنحني يحدث بشكل آني (في زمن مساو للصفر) ونلاحظ فرقاً بين القراءة $R = 0$ والقراءة المصححة R_0.

هذا الفرق يفسره الهبوط الآني للعينة بسبب انضغاط فقاعات الهواء في العينة، حيث لا بد من بقاء حيز صغير من الهواء حتى لو تم إشباع العينة تماماً.

ولتعيين معامل التشديد C_V نستفيد من خاصة النقطة **C** من المنحني النظري والتي توافق درجة تشديد $U = 90\ \%$. حيث نرسم المستقيم **AB** والذي تساوي فواصله **(1.15)** من فواصل ممدد الجزء الخطي من المنحني التجريبي **AC**.

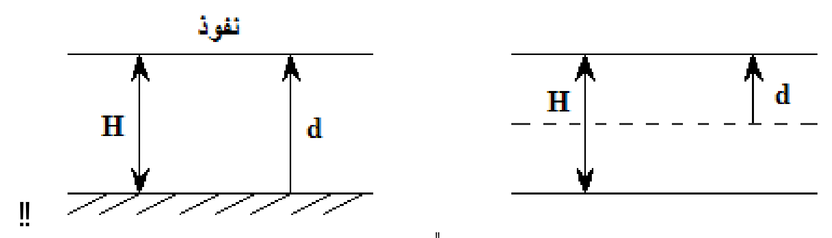
تقاطع الخط **AB** مع المنحني التجريبي يعطينا النقطة **E** وهي تشابه النقطة **C** على المنحني النظري، وبالتالي فإن النقطة **E** تقابل درجة تشديد $U = 90\ \%$ وعامل زمن قيمته $T_V = 0.848$ وعلى المنحني التجريبي تقابل القراءة R_{90} والزمن $\sqrt{T_{90}}$ وبالتالي فإن C_V يعطى بالعلاقة:

$$C_V = \frac{T_V . d^2}{t} = \frac{0.848 \times d^2}{t_{90}}$$

حيث:

تشديد $U = 90\ \%$.

d: طول مسار التصريف الشاقولي في المرحلة المدروسة:
d = H / 2 في حال كان التصريف من اتجاهين، **d = H** في حال التصريف من اتجاه واحد فقط.
حيث **H** سماكة العينة.!!!



الشكل (3- 17): طول مسار التصريف حسب الحالة المدروسة [10]

بعد تحديد النقطة **E** الموافقة لدرجة تشديد **U = 90 %** يمكن تحديد النقطة **F** الموافقة لدرجة تشديد **U = 100 %** والموافقة للقراءة R_{100} بالعلاقة:

$$R_{100} = R_o + \frac{10}{9} \times AG$$

2. طريقة لوغاريتم الزمن (Log t) لكاساغراندي:

تعتمد هذه الطريقة على مقارنة منحني التشديد النظري والذي يمثل العلاقة بين درجة التشديد **U** ولوغاريتم عامل الزمن **Log** T_V مع المنحني التجريبي بين الهبوط ولوغاريتم الزمن حيث نلاحظ أن المنحني النظري عبارة عن جزء من قطع مكافئ في بدايته ثم جزء خطي ثم يقطع المحور ($\log T_V$) عند درجة التشديد **U = 100 %**، الشكل (3 - 18) يوضح المنحني النظري.

نلاحظ فرقاً بين القراءة **R = 0** والقراءة الصفرية R_o وهذا الفرق يفسره حدوث انضغاط آني لفقاعات الهواء المحصورة، الشكل (3 - 19) يوضح المنحني التجريبي.

تدعى القراءة R_o بالقراءة الصفرية المصححة وهي البداية الفعلية لمنحني التشديد الرئيسي وتقابل درجة تشديد **U = 0 %**.

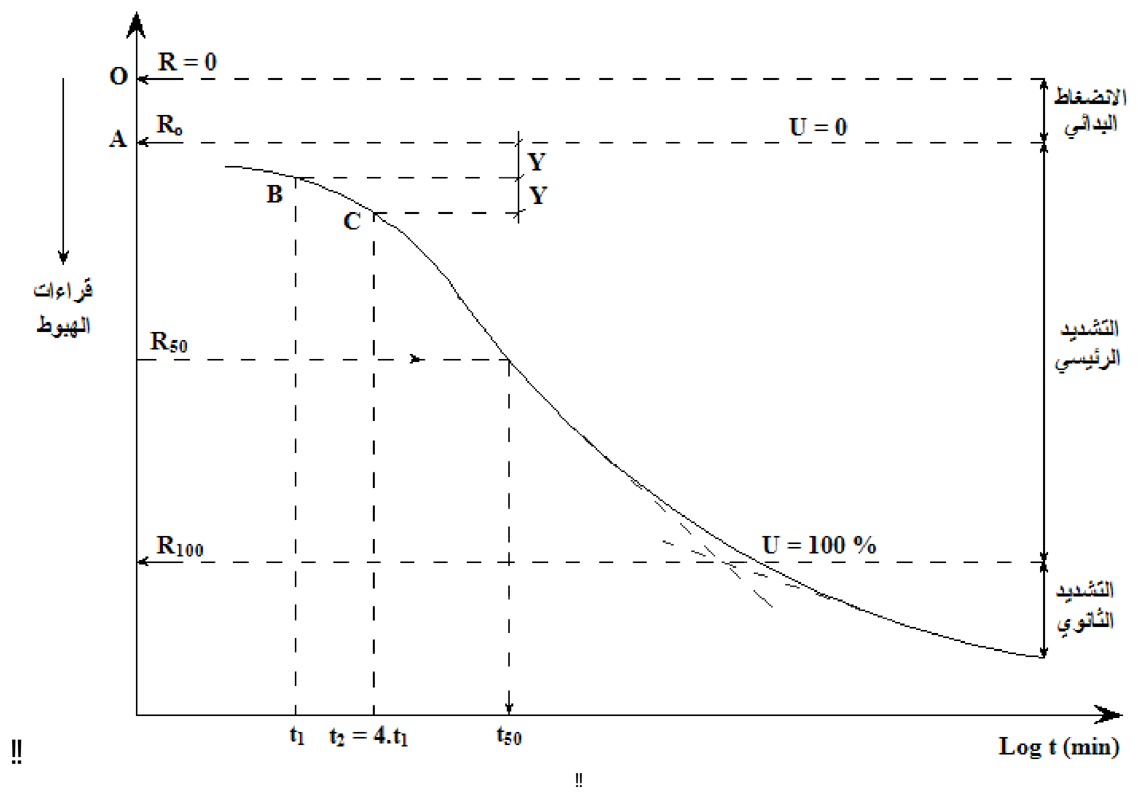


!!>10@ !!Œ dede!! /! ! !ž !! !! /!! !!!! !! !!Œ !š!! !Œ18!! 3!!¾! !Œ

لتعيين البداية الفعلية نلاحظ أن الجزء الأول من المنحني التجريبي على شكل قطع مكافئ وعلى هذا ... والموافقتين للأزمنة t_1, t_2 على الترتيب وحيث: $t_2 = 4 \times t_1$، وبالاعتماد على

خواص القطع المكافئ يمكن تعيين النقطة **A** التي تقع على محور الهبوط وعلى مسافة **Y** فوق النقطة **B**. وتكون النقطة **A** هي البداية الفعلية وتقابل القراءة الصفرية المصححة R_o.

يتم تعيين القراءة R_{100} بتحديد نقطة تقاطع مماس منحني التشديد الثانوي مع مماس منحني التشديد الرئيسي، نقطة التقاطع تحدد لنا القراءة R_{100} وهي تقابل درجة تشديد $U = 100\ \%$.



!!

!!

!!>10@ !ƒ! ! !!Œ !š!! !Œ19!! 3!!¾! !Œ

!!

نحصل على القراءة R_{50} بتنصيف المسافة بين القراءتين R_0 و R_{100} حيث R_{50} هي القراءة الموافقة لحدوث (50 %) من التشديد الرئيسي وتقابل زمناً t_{50}، وبالتالي يمكن تحديد قيمة عامل التشديد الشاقولي من العلاقة: C_V

$$C_V = \frac{T_V . d^2}{t_V}$$

وبما أن قيمة T_V الموافقة لدرجة تشديد $U = 50\ \%$ هي $T_V = 0.197$، ومنه:

$$C_V = \frac{0.197 . d^2}{t_{50}}$$

d: طول مسار التصريف الشاقولي في المرحلة المدروسة ويساوي سماكة العينة المدروسة عند التصريف من طرف واحد، ونصف سماكتها عند التصريف من طرفين.

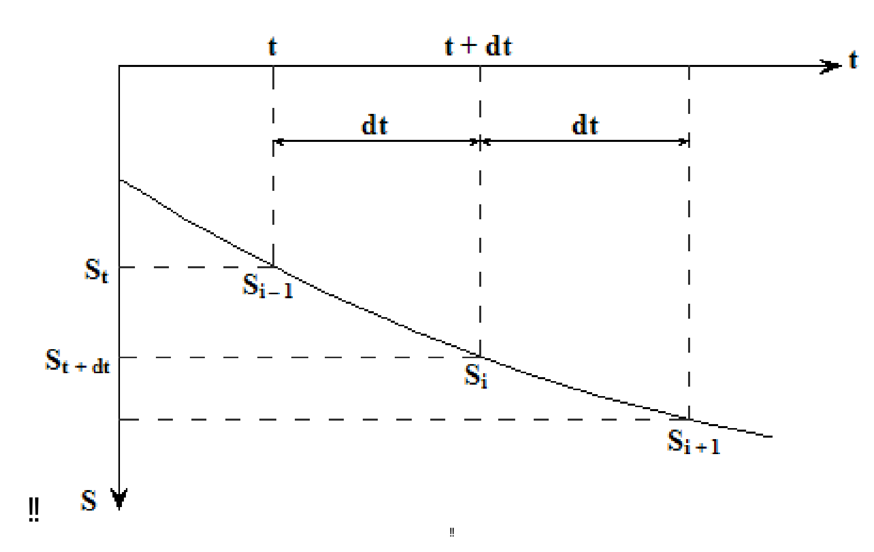
3. تعيين معامل التشديد بطريقة أوزاكا:

وهي طريقة التحليل الحدي التي أوجدها العالم الياباني أوزاكا عام **1978** وهي تعتمد على فهم نظرية ترزاكي في التشديد.

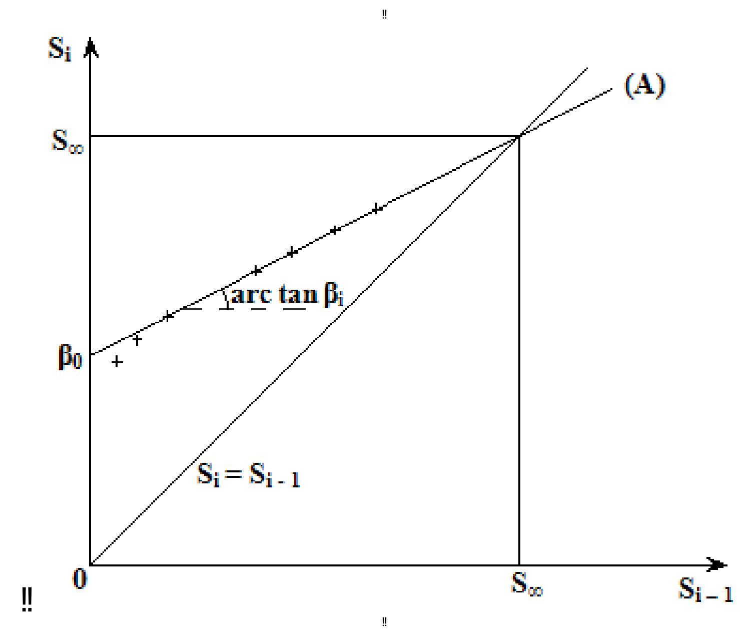


يتم تمثيل نتائج تجربة التشديد إما على شكل مخطط خطي أو منحني نصف لوغاريتمي لعلاقة الانضغاط مع الزمن، ثم نختار على منحني الانضغاطية مجموعة من النقاط: S_t، S_{t+dt}، وهي موافقة للهبوطات خلال فواصل زمنية نظامية قدرها **dt**، الشكل (3 - 20).

هناك ترتيب آخر من النقاط هو S_i، S_{i-1}، مبين على مخطط شبيه بالمخطط السابق نحصل من خلاله على المستقيم **(A)**، الشكل (3 - 21).



!!>10@ƒ!! !!Œ¼dœ!! ƒƒ!!!dœŒ!!!!ƒ!!!!20!! 3!!¾! !Œ



!!>10@ƒ!! !!Œ¼dœ!! ƒƒ!!!dœŒ!!!!ƒ!!!!21!! 3!!¾! !Œ

المستقيم **(A)** المبين في الشكل (3 - 21) يتقاطع مع منصف المحاور الموافق للنقاط التي تحقق:

$$S_i = S_{i-1} = S_\infty$$

حيث: S_∞ هي قيمة الهبوط النهائي.

إن ميل المستقيم **(A)** يسمح بحساب معامل التشديد بهذه الطريقة وذلك باستخدام العلاقة:



$$C_V = -\text{Ln}\beta . \frac{5.d^2}{12.dt}$$

d: طول مسار التصريف تبعاً للحالة المدروسة.

β: ميل المستقيم **(A)**.

4. تعيين معامل التشديد بالطريقة الحسابية:

أوجد هذه الطريقة الباحثان سيفارام وسوامي عام **1977** وتتلخص بالخطوات التالية:

1. نسجل قراءتين من قراءات الهبوط R_1، R_2 خلال تجربة التشديد مع الزمن وهما تقابلان الزمنين t_1، t_2 على الترتيب بشرط أن تحقق كلاً من القراءتين المتراجحة $U \le 50\ \%$.
2. يتم تسجيل القراءة R_3 عند الزمن t_3 بعد تشديد العينة بمقدار لا بأس به.
3. نعين القراءة الصفرية R_0 الموافقة لدرجة تشديد $U = 0$ من العلاقة التالية:

$$R_0 = \frac{R_1 - R_2 . \sqrt{t_1 / t_2}}{1 - \sqrt{t_1 / t_2}}$$

4. نعين القراءة R_{100} الموافقة لدرجة تشديد $U = 100\ \%$ كما يلي:

$$R_{100} = R_0 \frac{R_0 - R_3}{\left[1 - \left\{(R_0 - R_3).(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}).(R_1 - R_2).\sqrt{t_3}\right\}^{5.6}\right]^{0.179}}$$

5. بعد ذلك يتم تعيين معامل التشديد الشاقولي C_V من العلاقة:

$$C_V = \frac{\pi}{4} \left[\frac{R_1 - R_2}{R_0 - R_{100}} . \frac{d}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right]^2$$

حيث **d** طول مسار التصريف تبعاً للحالة المدروسة.

6. نعيد الحسابات السابقة ثلاث مرات على الأقل من أجل قراءات مختلفة ونأخذ متوسط القيم الناتجة لمعامل التشديد C_V فتكون هي القيمة المطلوبة.

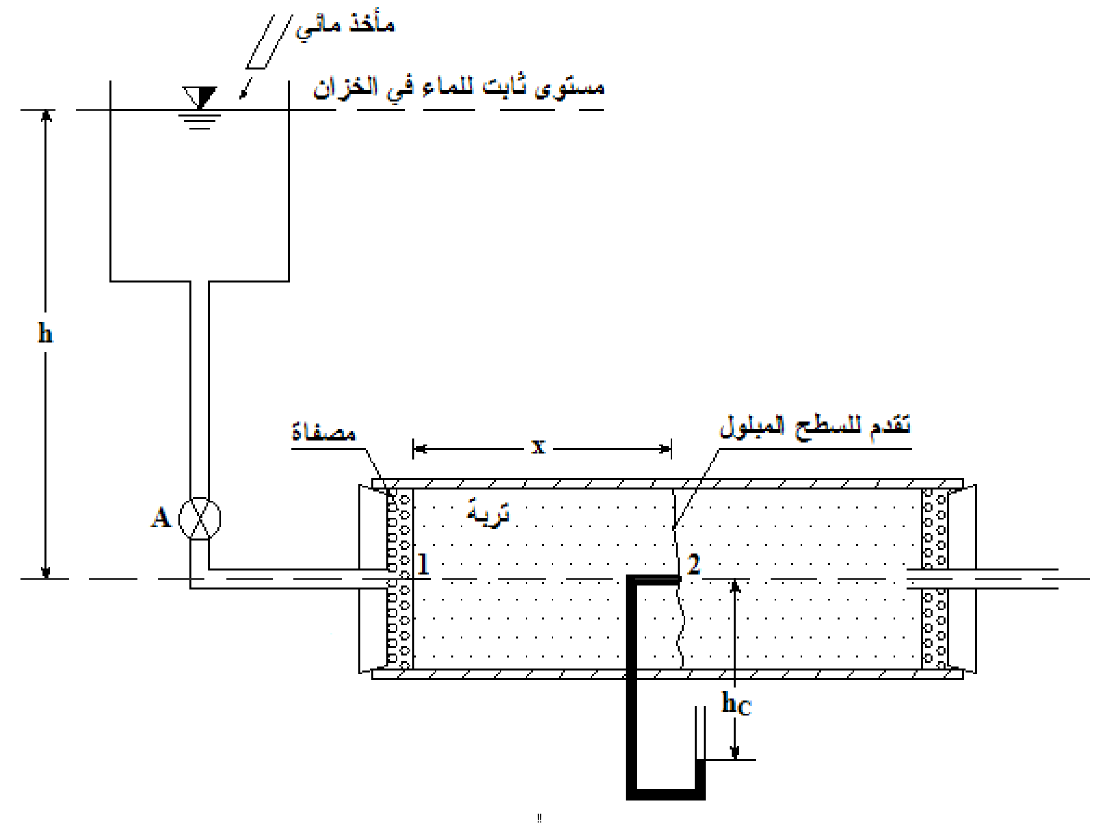
بعد حساب قيمة معامل التشديد الشاقولي يمكن حساب قيمة عامل النفاذية من العلاقة التالية:

$$K = C_V . m_v . \gamma_w$$

3- 7- 1- 4- قياس عامل النفاذية من تجربة الامتداد الشعري الأفقي:

يمكن توضيح المبدأ الأساسي لهذه التجربة من خلال الشكل (3 - 22)حيث يتم وضع عيذ ة الترب ة الجاف ة في أنبوب أفقي فإذا كان الصمام (A) مفتوحاً فإن الم اء س وف يتس رب م ن الخ زان إل ى الأنب وب، وبت أثير الخاصة الشعرية يتقدم خط السطح المبلول ت دريجياً ف ي الترب ة وبمعذ ى آخ ر ف إن المس افة **x** م ن النقط ة **1** تكون تابعة للزمن **t** [10]، [20]، [46]، [47].





!!≯10@ !!! Œ ! !! !ŒŒ ! Œ!! ! !!!!22!! 3!!¾! !Œ

إن الضاغط الكلي في النقطة **1** يساوي الصفر حيث أن مستوي المقارنة مار بهذه النقطة، وفي النقطة **2** التي تتوضع مباشرةً إلى يسار السطح المبلول يكون الضاغط الكلي مساوياً للقيمة $h + h_C$ وبالاعتماد على قانون دارسي نجد:

$$V = n \times S_r \times V'$$

حيث:

n: المسامية.

S_r: درجة الإشباع.

V: سرعة التسرب الحقيقية.

لكن: $V' = \frac{dx}{dt}$

$$i = \frac{1!!! !!!Œ !!! !!!Œ! \text{de} !Œ !2!!! !!!Œ !!! !!!Œ! \text{de} !Œ}{x}$$

$$i = 0 - \frac{-(h + h_C)}{x} = \frac{(h + h_C)}{x}$$

!!!Šž!! !Ÿ

$$V' = \frac{dx}{dt} = k \times \frac{1}{n \times S_r} \times \frac{h + h_C}{x}$$



$$\int_{x_1}^{x_2} x.dx = \int_0^t \frac{k}{n \times S_r}(h + h_C).dt$$

$$\frac{x_2^2 - x_1^2}{t} = \frac{2k}{n \times S_r} \times (h + h_C)$$

تعتبر العلاقة الأخيرة هي العلاقة الأساسية في تحديد قيمة عامل النفاذية بالاعتماد على تجربة الامتداد الشعري الأفقي.

3- 7- 2- الطرق الحقلية لقياس عامل النفاذية:

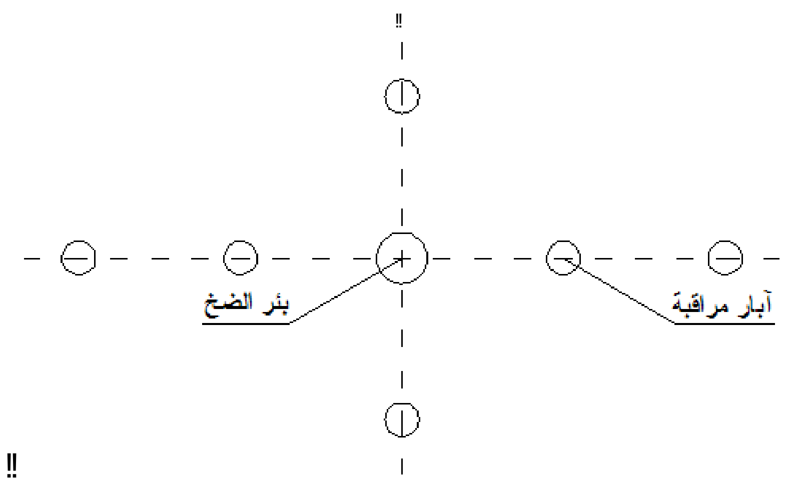
غالباً ما تكون نتائج قياس عامل النفاذية في المخبر غير دقيقة نظراً لصعوبة رص تربة العينة إلى الكثافة نفسها في حالتها الطبيعية. حيث أنه من الصعوبة جداً عند وضع عينة في الجهاز المخبري أن نحافظ على بنيتها وخواصها كما هي في الطبيعة في حين أن إجراء التجارب الحقلية يساهم في التوصل إلى نتائج تصف التربة وهي في حالة توضعها الطبيعي.

كذلك فإن قيم الميل الهيدروليكي المطبق أثناء التجربة المخبرية تكون بالضرورة أكبر بكثير منها في الطبيعة، ويؤثر هذا الاختلاف على قيمة عامل النفاذية بالإضافة إلى ذلك فإن قياس عامل النفاذية يتم على عينات مشبعة إلا أن الجريان في الطبيعة لا يحدث دوماً في تربة مشبعة.

ولذلك بناءً على الصعوبات المذكورة فإن إجراء التجارب الحقلية يتم عند الحاجة لتحديد قيم دقيقة لعامل النفاذية في المشاريع الهندسية الهامة.

3- 7- 2 - 1 - اختبار الضخ من الآبار العادية (Pumping Test):

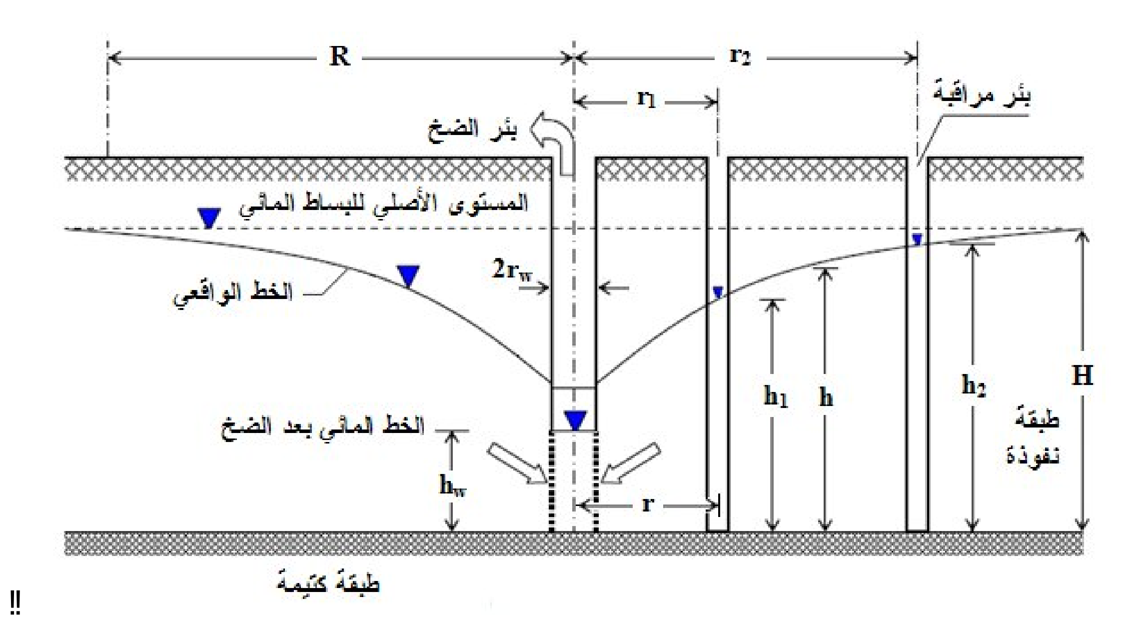
تستخدم هذه التجربة لتعيين قيمة عامل النفاذية للترب الخشنة والمتجانسة المستندة إلى طبقة كتيمة ويتم ذلك من خلال حفر بئر حتى نهاية الطبقة النفوذة ومن ثم ضخ الماء منه بمعدل ثابت حتى يصل منسوب الماء في البئر إلى حد ثابت تقريباً، وتتم مراقبة حالة الانتظام لسطح الماء بحفر آبار مراقبة قريبة من بئر الضخ باتجاهين متعامدين أحدهما موازٍ لاتجاه الجريان والآخر عمودي عليه، [10]، [11]، [43]، كما في الشكل (3 - 23).



Œ! !¾!(3- 23): قياس النفاذية حقلياً بواسطة الآبار العادية [11]

ويبين الشكل (3 - 24) مقطعاً شاقولياً ماراً بأحد آبار الضخ وآبار المراقبة:





!!

!!>11@ƒ!deŒde ŒE!!! ! !ŒE de! ŒE24!! 3!!¾! !Œ

عندما نصل إلى حالة ثبات منسوب الماء فإن معدل الجريان باتجاه مركز البئر يعطى عندئذٍ بالعلاقة:

$$q = k \times i \times A$$

إن قيمة الميل الهيدروليكي تساوي تقريباً $\frac{dh}{dr}$ كذلك فإن: $A = 2\pi \times r \times h$

حيث أن **A** تمثل السطح الذي يغذي البئر أثناء ضخ الماء ويساوي مساحة السطح الجانبي لأسطوانة نصف قطرها **r** وارتفاعها **h**. وبالتالي فإن:

$$q = k \times \frac{dh}{dr} \times 2\pi \times r \times h$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{2\pi}{q} \times k \times h \times dh$$

وبمكاملة العلاقة السابقة بين (r_1 , r_2) وهي أبعاد مراكز آبار المراقبة عن مركز بئر الضخ، وبين (h_1 , h_2) وهي ارتفاع الماء في بئري المراقبة، نجد ما يلي:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi \times k}{q} \int_{h_1}^{h_2} h.dh$$

$$k = \frac{2.303 \times q \times \log_{10} \frac{r_2}{r_1}}{\pi \times (h_2^2 - h_1^2)}$$

ويمكن حساب عامل النفاذية من العلاقة السابقة إذا كانت قيم (q, r_1, r_2, h_1, h_2) معلومة من القياسات الحقلية وتبعاً لكوزني فإن نصف قطر التأثير الأعظمي **R** للتجربة المبينة في الشكل (3 - 24) يساوي:

$$R = \sqrt{\frac{12 \times t}{n} \times \sqrt{\frac{q \times k}{\pi}}}$$

دروسة.



t: الزمن الموافق لكي يثبت تصريف الماء من البئر المنشأ.
عندما تكون $r_1 = r_w$ يكون $h_1 = h_w$ وعندما $r_2 = R$ يكون $h_2 = H$، وبتعويض هذه القيم في علاقة **k**، ينتج ما يلي:

$$k = \frac{2.303 \times q \times \log_{10} \frac{R}{r_w}}{\pi \times (H^2 - h_w^2)}$$

حيث أن **H** هو الارتفاع الأصلي لمنسوب الماء الجوفي بدءاً من الطبقة الكتيمة.

إن العمق **h** من أي مسافة **r** من البئر حيث أن $(r_w < r < R)$ يمكن أن يحدد بتعويض $h_1 = h_w$ عندما $r_1 = r_w$، و $h_2 = h$ عندما $r_2 = r$، في المعادلة السابقة:

$$k = \frac{2.303 \times q \times \log_{10} \frac{r}{r_w}}{\pi \times (h^2 - h_w^2)}$$

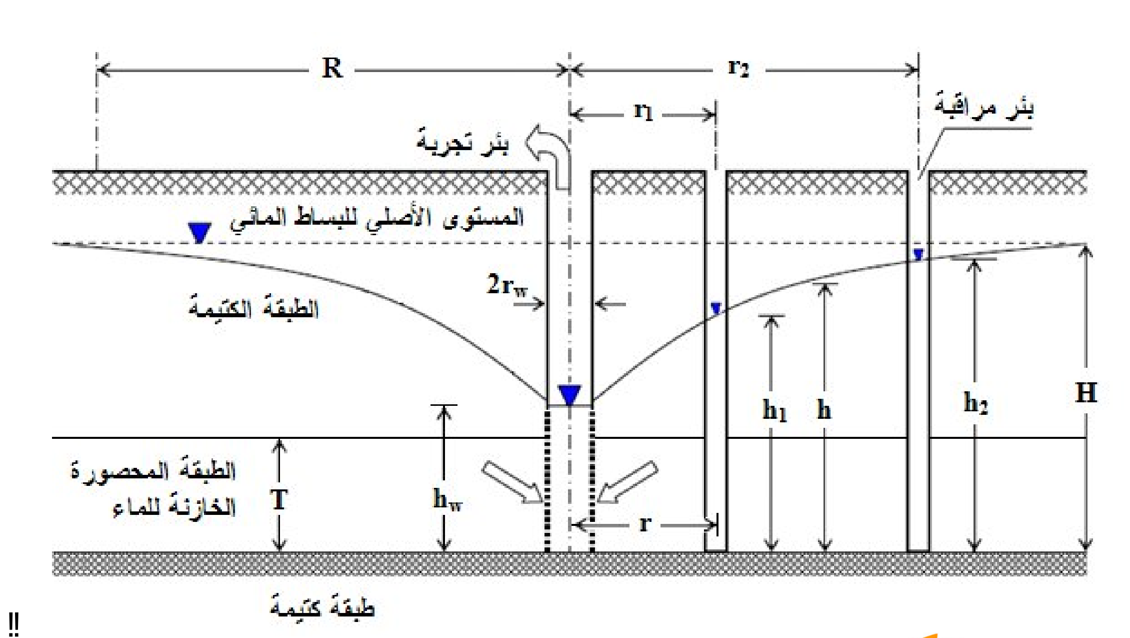
وبالتالي فإن العمق **h** يساوي:

$$h = \sqrt{\frac{2.303 \times q}{\pi \times k} \times \log_{10} \frac{r}{r_w} + h_w^2}$$

3-7 -2 - 2 - اختبار الضخ من الآبار الارتوازية:

تختلف الآبار العادية عن الآبار الارتوازية في أن البئر الارتوازي يكون معرضاً لضغط هيدروليكي نتيجة لأن الطبقة الحاملة للماء تكون محصورة بين طبقتين غير نفوذتين بحيث يمكن للمياه المحصورة أن ترتفع داخل أنبوب بيزومتري إلى منسوب أعلى من السطح العلوي للطبقة الحاملة للمياه للوصول إلى سطح المياه الحر للمياه الجارية الذي لولا وجود الطبقة غير النفوذة (الكتيمة) لارتفعت المياه إليه ويمكن للمياه المحصورة أن تتدفق في صورة عين ارتوازية إذا ما حدث شق في الطبقة الكتيمة. ويمكن تحديد قيمة عامل النفاذية في طبقة محصورة وخازنة للماء أيضاً بواسطة تجارب الضخ من الآبار [10]، [11]، [43].

يبين الشكل (3 - 25) بئر ارتوازي مخترق كامل العمق للطبقة المحصورة حيث يضخ الماء منها إلى الخارج بمعدل ثابت، وتستمر عملية الضخ حتى الوصول إلى حالة مستقرة [10]، [11].



!!>11@ƒ! Œ!! Œdt Œ!!! ! !Œdt! Œ25!! 3!!¾! !(



إن معدل الماء الذي يضخ للخارج عندما تصبح الحالة مستقرة يعطى بالعلاقة:

$$q = k \times i \times A = k \times \frac{dh}{dr} \times 2\pi \times r \times T$$

حيث أن **T** هي سماكة الطبقة المحصورة والخازنة للماء.

بمكاملة الطرفين نجد:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi \times k}{q} \int_{h_1}^{h_2} T.dh$$

$$k = \frac{q \times \log_{10} \frac{r_2}{r_1}}{2.727 \times T \times (h_2 - h_1)}$$

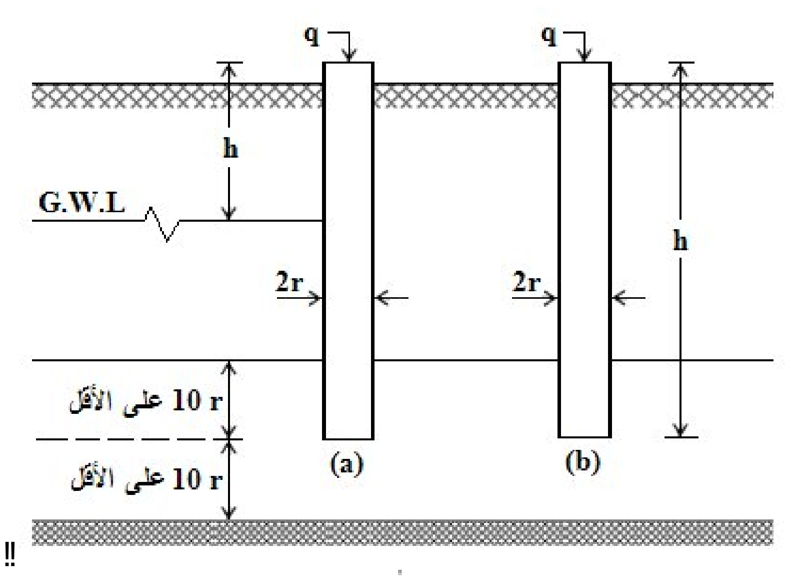
وهكذا فإنه يمكن تحديد قيمة عامل النفاذية **k** بملاحظة انخفاض سطح الماء في بئر المراقبة كما في الشكل (3 - 25). وإذا عوضنا $h_1 = h_w$ عند $r_1 = r_w$ و $h_1 = H$ عند $r_2 = R$ في المعادلة السابقة نحصل على ما يلي:

$$k = \frac{q \times \log_{10} \frac{R}{r_w}}{2.727 \times T \times (H - h_w)}$$

3-7- 2 - 3 - تجربة السبر المفتوح من طرف واحد:

تعد تجارب الضخ من الآبار عملية مكلفة وغير اقتصادية لذلك يمكن اللجوء إلى السبور الآلية في كثير من حالات تعيين عامل النفاذية للتربة والصخور.

يبين الشكل (3 - 26) مخططاً لتحديد قيمة عامل نفاذية التربة بواسطة سبر بطرف مفتوح. حيث يتم إدخال قمصان الحماية في السبور ومدها إلى طبقات التربة المطلوب تحديد نفاذيتها إذ يمكن أن يكون منسوب الماء الجوفي فوق القمصان أو تحتها أو أسفلها، وقبل المباشرة بتجربة النفاذية يتم تنظيف حفرة السبر ثم تبدأ التجربة بإضافة ماء نظيف للحفاظ على الجريان بضاغط ثابت [11]، [20]، [43].



!!>20@šŒ! !! !! !!! !!Ž!!Œ!! !Œ!!! !!!26!! 3!!¾! !Œ



ويمكن تحديد قيمة عامل النفاذية في هذه الحالة من العلاقة التالية:

$$k = \frac{q}{5.5 \times r \times h}$$

حيث أن:

r: نصف القطر الداخلي للقميص.

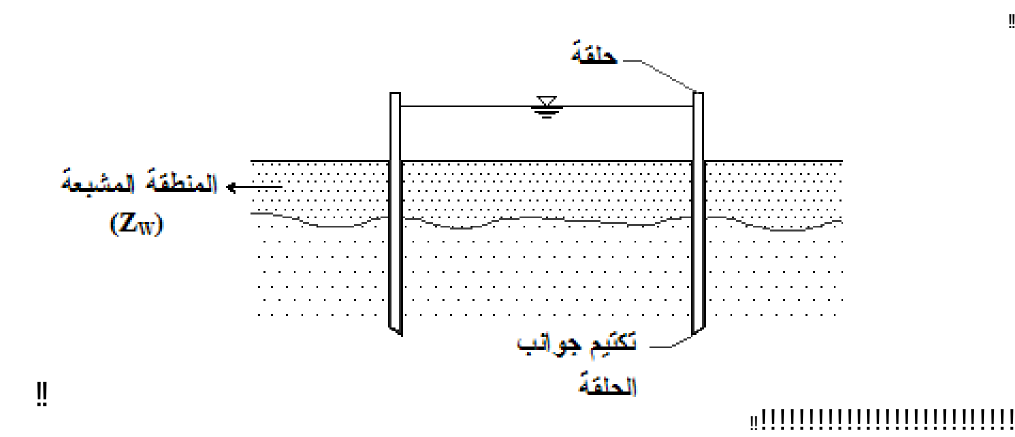
h: الفرق في الضاغط الهيدروليكي.

q: معدل التغذية بالماء للحفاظ على ضاغط ثابت.

3-7- 2 - 4 - قياس النفاذية بواسطة أجهزة الرشح المفتوحة:

تشبه هذه الطريقة الطرق المخبرية أي رشح شاقولي بتأثير ضاغط ضعيف، ويتألف الجهاز من حلقة واحدة أو حلقتين (الهدف من الحلقة الخارجية الحفاظ على الجريان في الحلقة الداخلية) حيث يتم قياس التصريف السطحي بتأثير ضاغط أو عدة ضواغط هيدروليكية [11]، [20]، [43].

يتم وضع حلقة أو حلقتان متحدتا المركز على سطح التربة المراد اختبار نفاذيتها، وتملأ بالماء لنفس المستوى ثم يتم قياس مستوى الماء الراشح في الحلقة الداخلية مع الزمن ويمكن عندها حساب قيمة عامل النفاذية باستخدام قانون دارسي، ويمكن تحديد عمق المنطقة المشبعة من خلال تشريح التربة في نهاية التجربة، وعلى اعتبار أن جهاز الرشح المفتوح معرض للتبخر لذلك يجب حمايته من أجل التجارب التي تأخذ وقتاً طويلاً أو يتم إجراء التصحيحات اللازمة على القياسات.



!!>20@(OSRI)!!! ƒ! !!!!!š!!! !!Ž!!ŒŠ! !!Œdé!!!27!! 3!!¾! !Œ

الحلقة الخارجية

الحلقة الداخلية

المنطقة المشبعة

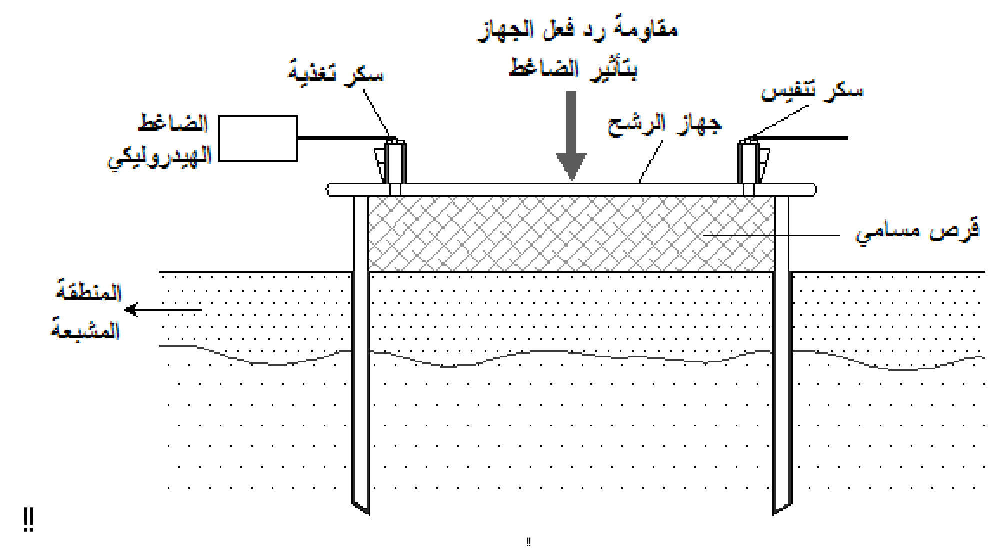
(Zw)

الشكل (3- 28): جهاز الرشح المفتوح بحلقة مزدوجة (ODRI) [20]

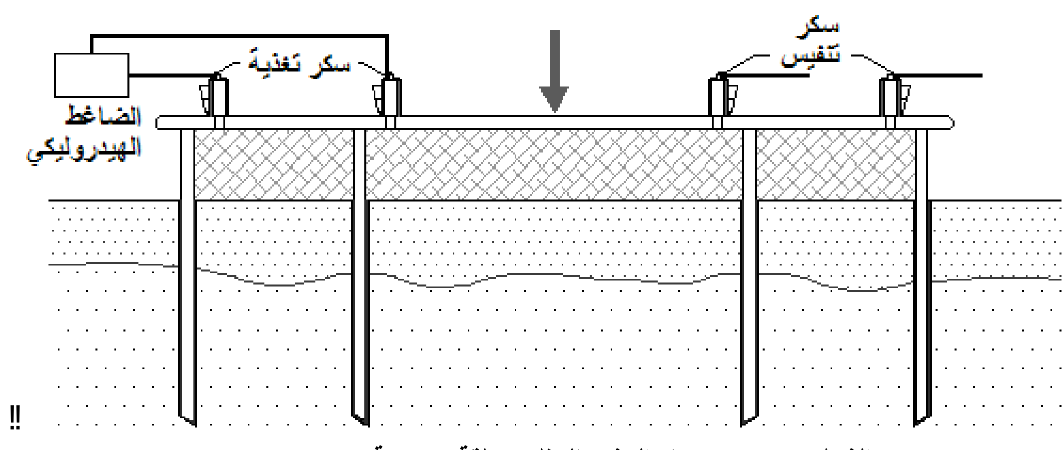
3-7- 2 - 5 - قياس النفاذية بواسطة أجهزة الرشح المغلقة:



تختلف عن أجهزة الرشح المفتوحة بأن الضاغط الهيدروليكي المطبق ضمن الحلقات أكبر من ارتفاع الحلقات المغطاة بغطاء كتيم وتسمح هذه الأجهزة بقياس الحجم الراشح من الماء [11]، [20]، [43].



!!>20@SSRI)!!! ƒ! !!!!!š!!ž !!!!ŒŠ! !!Œœ!!!29!! 3!!¾! !Œ



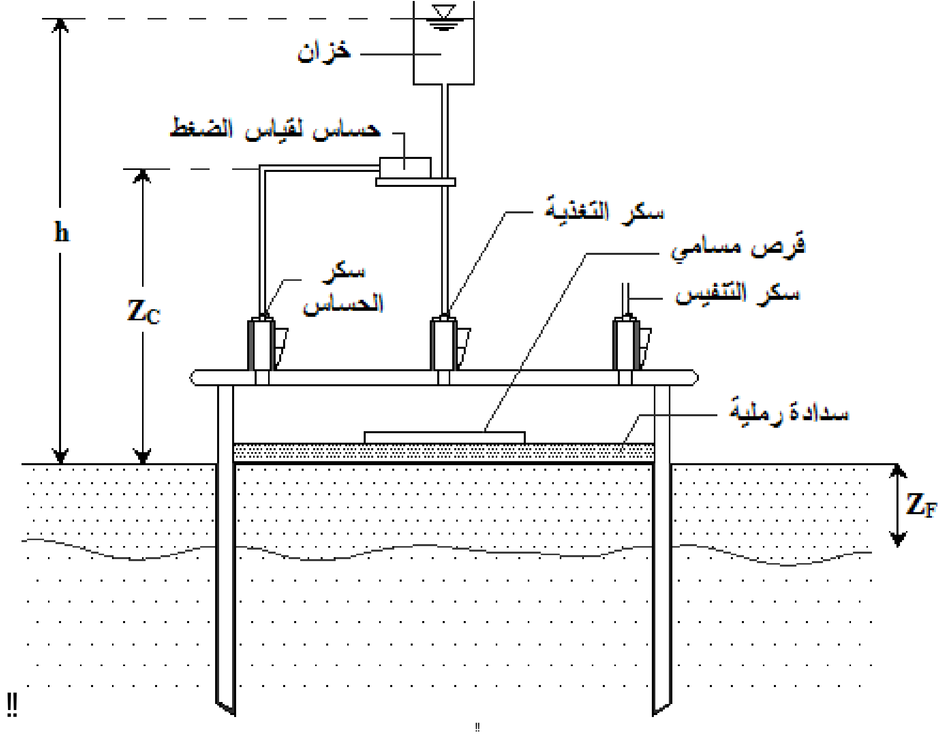
الشكل (3- 30): جهاز الرشح المغلق بحلقة مزدوجة (SDRI) [20]

وتعتبر الطريقتان السابقتان من أكثر الطرق الحقلية المتبعة لاختبار نفاذية الترب الناعمة في الموقع في القطر العربي السوري.

3- 7- 2 - 6 - قياس النفاذية بواسطة جهاز الرشح المغلق AEP (Air Entry Permeability):

وهو عبارة عن جهاز رشح بحلقة بسيطة تم تطويره من قبل الباحث **Bouwer** عام **1966** في الولايات المتحدة الأمريكية حيث يسمح بقياس النفاذية حقلياً خلال عدة ساعات، الشكل (3 - 31). تتميز هذه الطريقة بسرعة إجراء التجربة وسرعة تحليل النتائج كما يمكن إجراؤها في حالتي الإشباع وعدم الإشباع [11]، [20]، [43].





الشكل (3- 31): جهاز الرشح المغلق من النوع (AEP) [20]

يتم إجراء التجربة وفق المراحل التالية:

- يتم تغذية الحلقة التي يتراوح قطرها بين **(30 - 20) cm** من خلال سكر التغذية الموصول بخزان حيث يبقى السكر مفتوحاً حتى تصبح سماكة المنطقة المشبعة **(10 cm)**.
- نغلق سكر التغذية ونفتح سكر الحساس فيبدأ الضاغط بالتناقص حتى يصل إلى قيمة دنيا.
- نفتح سكر التنفيس ونعيد الضغط داخل الحلقة إلى الضغط الجوي.
- يتم تحديد عمق المنطقة المشبعة إما بالقياس المباشر أو بالطرق الكهربائية.
- يتم تحديد الضاغط بالعلاقة التالية: $\psi_A = h_{min} + Z_C + Z_F$

حيث: ψ_A: قيمة الضاغط (قيمته سالبة في الترب غير المشبعة).

h_{min}: الضاغط الأدنى المحدد بالحساس (قيمته سالبة في الترب غير المشبعة).

Z_C: ارتفاع الحساس عن سطح الأرض.

Z_F: العمق الوسطي للمنطقة المشبعة.

- تحسب سرعة الرشح **v** في الحلقة في مرحلة الرشح الأولي عند الضاغط **h** وهو ارتفاع الماء في الخزان عن سطح التربة عند لحظة إغلاق سكر التغذية، وتحسب النفاذية من العلاقة:

$$k = \frac{v.Z_F}{h + Z_F - \frac{\psi_A}{2}}$$

3- 7- 2 - 7 - تجارب صدمة الضغط لتحديد النفاذية (Pulse Test):

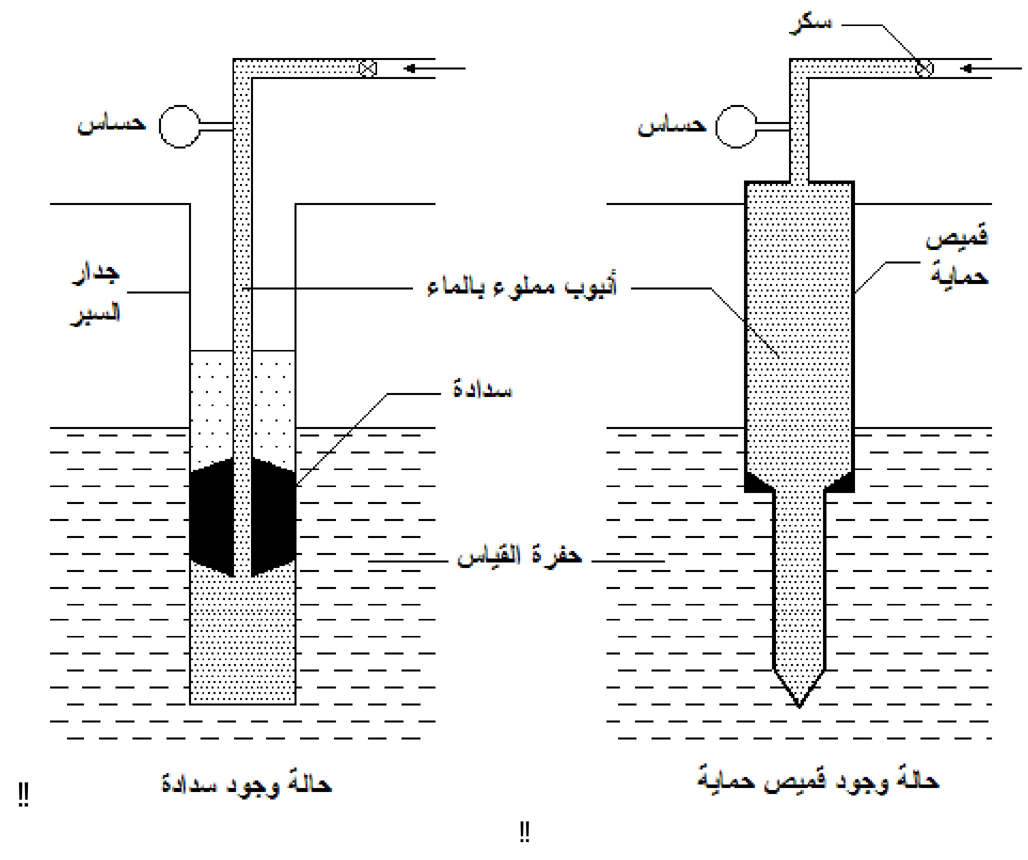
تعتبر هذه التجارب نوعاً جديداً من تجارب النفاذية التي تعتمد على الضاغط المتغير، وقد تم تطوير هذه التجارب في الولايات المتحدة الأمريكية من أجل الترب ذات النفاذية الضعيفة التي عامل نفاذيتها أقل من **(10^{-8} cm/sec)**، والهدف الرئيسي من تطوير هذه التجارب هو تخفيض زمن التجارب على الترب الناعمة بشكل كبير [20]، [43].

... ب من خلال تطبيق ضاغط موجب أو سالب (تبعاً لشروط الإشباع)، وكان أول ... ثان **Bredehoeft & Papadopoulos 1980**، ثم تم تعميم هذه الطريقة من قبل



الباحثين Neuzil 1982 , Aubertin 1988، وقد تم وضع نورم خاص بهذه التجارب ضمن مقاييس الجمعية الأمريكية لفحوصات المواد ASTM [48].

في هذه الطريقة يتم تطبيق صدمة ضغط من خلال تطبيق لحظي لضاغط هيدروليكي ضمن أنبوب القياس المملوء بحجم معلوم من الماء، ثم يتم تسجيل تغيرات الضاغط الهيدروليكي مع الزمن باستخدام حساس لقياس الضغط موصول مع جهاز خاص لتخزين وتحليل البيانات **Data Acquisition**.



!!

!!

‼>20@Pulse Test)!! !! !Œ!! !! !!ƒ! ! !!!32!! 3!!¾! !Œ

!!

3- 7- 3- الحل النظري لتعيين عامل النفاذية:

إن جريان الماء عبر الترب الناعمة هو جريان صفحي كما ذكرنا سابقاً. ويمكن تمثيل الفراغات المتصلة مع بعضها البعض في كتلة معطاة من التربة بعدد من الأنابيب الشعرية التي يستطيع الماء الجريان خلالها، وقد درس كل من كوزني وكارمان هذا الجريان وأعطيا العلاقة التجريبية التالية [10]، [28]، [40]:

$$k = \frac{1}{C_S \times S_S^2 \times T^2} \times \frac{\gamma_w}{\mu} \times \frac{e^3}{1+e}$$

حيث:

C_S: عامل الشكل للفراغات.

T: عامل التعرج ويمثل النسبة ما بين طول مسار الجريان الفعال وارتفاع عينة الاختبار.

S_S: السطح النوعي ويساوي المساحة السطحية لواحدة الحجم من الذرات الصلبة.

γ_w: الوزن الحجمي للماء.



إن معادلة كوزني ـ كارمان تصف الترب الحبيبية الخشنة بشكل جيد مثل الرمل وبعض أنواع السيلت حيث تكون العلاقة خطية بين عامل النفاذية وبين المقدار $\frac{e^3}{1+e}$، إلا أننا نجد بعض التعارض بشكل واضح عند تطبيق هذه المعادلة على الترب الغضارية.

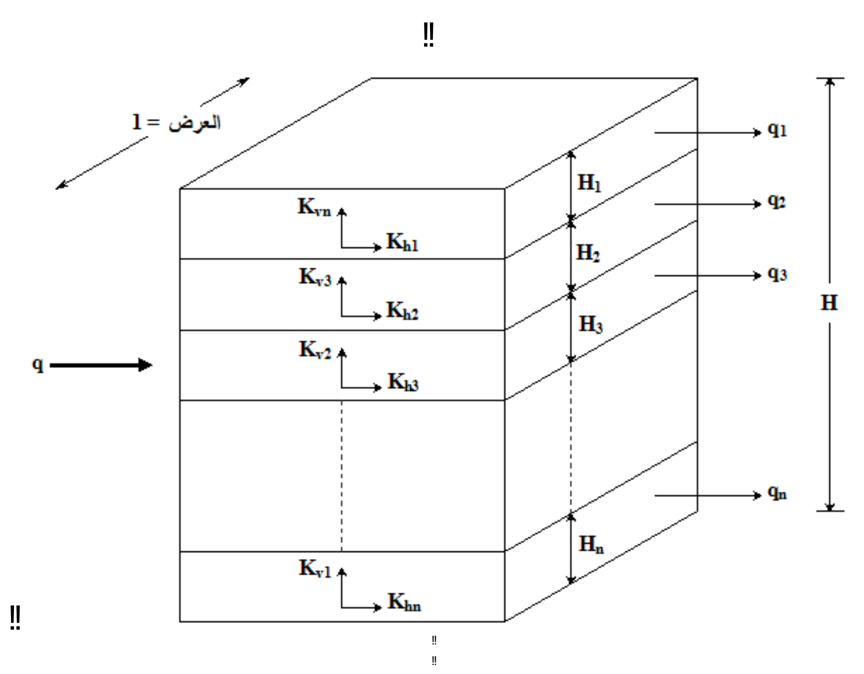
3- 7- 4- عامل النفاذية في حالة وجود طبقات ترابية غير متجانسة:

تختلف قابلية النفاذية في الترب تبعاً لاتجاه الجريان لذلك يتم إعطاء ثلاث قيم لعامل النفاذية تبعاً للاتجاهات **(X, Y, Z)**. وعلى الأغلب فإن قيم عامل النفاذية للتربة تكون متساوية في الاتجاهات الثلاثة غير أنه في حالة جريان الماء في طبقات ترابية غير متجانسة فإن قيم عامل النفاذية لا تكون متساوية لأنها تختلف من طبقة إلى أخرى. لذلك فقد تم إيجاد قيم وسطية مكافئة لعامل النفاذية في الاتجاهات المختلفة باعتبار أن الجريان خطي [10]، [29]، [33].

إن إيجاد القيمة الوسطية المكافئة لعامل النفاذية في الاتجاهين الأفقي والشاقولي يعتبر أمراً ممكناً في حالة توضع التربة على شكل طبقات ترابية مستمرة [30]، [40].

3- 7- 4-1- الجريان بالاتجاه الأفقي:

يبين الشكل (3 - 33) عدة طبقات ترابية متوضعة بشكل أفقي ونظراً لاختلاف خواص كل طبقة فإن عامل النفاذية لكل طبقة سيكون مختلفاً.



!!>10@ !!! Œde! Œ!!! qe! !Œ33!! 3!!¾! !Œ

لنفرض أن $(K_{h1}, K_{h2}, K_{h3}, ..., K_{hn})$ هي معاملات النفاذية للطبقات **(1, 2, 3, ..., n)** على التوالي والتي سماكاتها هي $(H_1, H_2, H_3, ..., H_n)$ على التوالي، وذلك من أجل الجريان الأفقي الموازي لسطح الطبقات، وبشكل مشابه لنفرض أن $(K_{v1}, K_{v2}, K_{v3}, ..., K_{vn})$ هي معاملات النفاذية لنفس الطبقات من أجل الجريان الشاقولي المعامد لسطح الطبقات، وباعتبار واحدة العرض لكل طبقات التربة فإن معدل التسرب في الاتجاه الأفقي يكون كالتالي:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n$$



حيث q هو معدل التسرب خلال مجموعة طبقات التربة المتطبقة، و $(q_1, q_2, q_3, ..., q_n)$ معدل التسرب خلال كل طبقة من طبقات التربة $(1, 2, 3, ..., n)$ على التوالي. وعلى اعتبار أن الجريان أفقي فإن قيمة الميل الهيدروليكي ثابتة من أجل كل الطبقات وبالتالي يكون:

$$q_1 = K_{h1} \times i \times H_1$$
$$q_2 = K_{h2} \times i \times H_2$$
$$q_3 = K_{h3} \times i \times H_3$$
$$\vdots$$
$$q = K_h \times i \times H$$

حيث:

i: الميل الهيدروليكي.

k_h: القيمة الوسطية المكافئة لعامل النفاذية في الاتجاه الأفقي.

H: ارتفاع طبقات التربة المدروسة حيث: $H = H_1 + H_2 + H_3 + ... + H_n$.

وبتعويض المعادلتين السابقتين في معادلة q، ينتج:

$$k_h \times H = k_{h1} \times H_1 + k_{h2} \times H_2 + k_{h3} \times H_3 + ... + k_{hn} \times H_n$$

وبالتالي فإن:

$$k_h = \frac{k_{h1} \times H_1 + k_{h2} \times H_2 + k_{h3} \times H_3 + ... + k_{hn} \times H_n}{H}$$

!!

3- 7- 4-2- الجريان بالاتجاه الشاقولي:

الرشح بالاتجاه الشاقولي أي أن الجريان معامد لسطح طبقات التربة، وعلى اعتبار أن مبدأ استمرارية الجريان محقق فإن ذلك يعني أن تكون سرع الجريان متساوية في كافة الطبقات أي أن [10]، [33]:

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = ... = v_n$$

حيث أن $(v_1, v_2, v_3, ..., v_n)$ هي سرعات الجريان في طبقات التربة $(1, 2, 3, ..., n)$ على التوالي، وبالتالي فإن:

$$v = k_v \times i = k_{v1} \times i_1 = k_{v2} \times i_2 = k_{v3} \times i_3 = ... = k_{vn} \times i_n$$

حيث:

k_v: القيمة الوسطية المكافئة لعامل النفاذية في الاتجاه الشاقولي.

$(K_{v1}, k_{v2}, k_{v3}, ..., k_{vn})$: تمثل معاملات النفاذية من أجل الجريان في الاتجاه الشاقولي في طبقات التربة $(1, 2, 3, ..., n)$ على التوالي.

$(i_1, i_2, i_3, ..., i_n)$: قيم الميل الهيدروليكي لطبقات التربة $(1, 2, 3, ..., n)$ على التوالي.

ومن أجل الجريان في الاتجاه المعامد لسطح الطبقات فإن ضياع الضاغط الكلي يساوي مجموع ضياعات الضاغط في طبقات التربة $(1, 2, 3, ..., n)$، وبالتالي فإن:

$$H \times i = H_1 \times i_1 = H_2 \times i_2 = H_3 \times i_3 = ... = H_n \times i_n$$

من المعادلتين السابقتين نجد ما يلي:

$$\frac{v}{k_v} \times H = \frac{v}{k_{v1}} \times H_1 + \frac{v}{k_{v2}} \times H_2 + \frac{v}{k_{v3}} \times H_3 + ... + \frac{v}{k_{vn}} \times H_n$$

وبالتالي فإن:

$$k_v = \frac{H}{\frac{H_1}{k_{v1}} + \frac{H_2}{k_{v2}} + \frac{H_3}{k_{v3}} + ... + \frac{H_n}{k_{vn}}}$$



3 - 8 - دراسة التسرب في السدود الترابية:

3 - 8 - 1 - مقدمة عن السدود الترابية:

تعتبر السدود من المنشآت الهندسية القديمة جداً، فقد بنيت أوائل السدود في العالم قبل أكثر من خمسة آلاف سنة، وكان المصريون القدامى السباقون لبناء أول وأضخم السدود التي عرفتها البشرية، وليس هذا فحسب، بل ابتكروا أيضاً العديد من النماذج المختلفة للسدود والكفيلة بتنظيم جريان الأنهار والحد من الفيضانات وتلبية حاجاتهم من المياه للسقاية والري [2].

والسد الترابي هو حاجز ترابي كتيم يعترض المجرى المائي مشكلاً خلفه بحيرة. ولاشك أن السدود الترابية من أقدم أنواع السدود التي أقيمت من قبل الإنسان قبل عدة آلاف من السنين قبل الميلاد في كل من مصر والهند والبيرو وغيرها من البلدان [1]، [2].

وتبنى السدود بشكل عام للأغراض التالية [2]:

- تخزين المياه وتغذية المياه الجوفية لتأمين الاحتياجات المائية لمشاريع الري وخاصة في فصل الجفاف، وتوفير مياه الشرب للأماكن المأهولة بعد مرور هذه المياه ضمن محطات تنقية وكذلك توفير مياه الشرب للمواشي والأغراض الصناعية.
- الحد من الفيضانات والتقليل من أضرارها وتنظيم الجريان في المجاري المائية.
- توليد الطاقة الكهربائية وذلك بالاستفادة من فرق ارتفاع الماء أمام السد حيث يتم توجيه المياه من أعلى سطح بحيرة التخزين بواسطة مجرى بيتوني مغلق أو أنبوب معدني نحو محطة كهرومائية تقع خلف السد.
- تنمية المنطقة المحيطة بالسد والبحيرة اقتصادياً وسياحياً.

3 - 8 - 2 - تصنيف السدود الترابية:

أولاً: حسب مادة البناء المستخدمة [1]، [2]:

- سدود ترابية طبيعية: في هذا النوع من السدود ينجز **(50 %)** أو أكثر من حجم جسم السد من التربة الغضارية ناعمة الحبيبات أو التربة الرملية أو الحصوية الرملية.
- سدود ترابية حجرية (ركامية): يتألف القسم الأساسي من جسم السد من ترب حصوية خشنة أو فتات صخري، وتحتوي على عنصر مضاد للرشح منفذ من تربة غضارية أو تربة ناعمة الحبيبات (سيلت - سيلت غضاري - غضار رملي ...).
- سدود حجرية: يتألف القسم الأكبر منها من تربة خشنة الحبيبات (كتل حجرية) ويتم تنفيذ العنصر المضاد للرشح من مواد غير ترابية (جدران حاجزة داخلية أو حواجز رقيقة).

كما يمكن استخدام الفولاذ أو الرقائق البلاستيكية أو الخرسانة الإسفلتية أو الخرسانة العادية في بناء السد الترابي، وكافة هذه الأنواع من السدود ذات مقطع عرضي على هيئة شبه منحرف مع خط محيطي مستقيم أو منكسر لميل الواجهتين الأمامية والخلفية.

ثانياً: حسب التصميم: تقسم السدود الترابية إلى ما يلي [1]، [2]:

- سدود متجانسة: يتم تنفيذها بدون عنصر مضاد للرشح.
- سدود غير متجانسة: يتكون جسم السد من التربة المتجانسة ويحتوي على عنصر مضاد للرشح يتكون من ترب ناعمة جداً (نواة مركزية، أو نواة مائلة، أو شاشة مع حصيرة).

ثالثاً: حسب طريقة الإنشاء [1]، [2]:

- سدود ردمية: تشيد بطريقة الردم على هيئة طبقات، الواحدة تلو الأخرى ثم يتم دحل كل طبقة ميكانيكياً للوصول إلى الكثافة التصميمية.
- سدود ترسيبية: يتم إنشاؤها بطريقة إهالة التربة في النهر (التجريف الهيدروليكي)، وذلك بنقل التربة بمساعدة الماء الموجه بمضخات خاصة بذلك إلى جسم السد.



- سدود نصف ترسيبية: يتم إنشاء النواة فقط بواسطة التجريف الهيدروليكي أما باقي جسم السد يتم إنشاؤه بطريقة الردم الجاف.
- سدود تبنى بطريقة التفجير الموجه: يتم إنشاء هذه السدود من الفتات الصخري الناتج عن عمليات تفجير جوانب الموقع، ومن شروط استخدام هذه الطريقة أن يكون الموقع ضيقاً ويقع في مناطق جبلية أي عمق الوادي أكبر من عرضه، ومن مساوئ هذا النوع من السدود أنها نفوذة للماء.

رابعاً: حسب ارتفاع السد: تصنف السدود تبعاً لارتفاعها حسب الكود الروسي كما يلي [1]، [2]:

- سدود منخفضة الارتفاع: $H \le 30$ m، وتعتبر من الدرجة **IV**.
- سدود متوسطة الارتفاع: $(30 \le H \le 75)$ m، وتعتبر من الدرجة **III**.
- سدود عالية: $(75 < H \le 125)$ m، وتعتبر من الدرجة **II**.
- سدود عالية جداً: $H > 125$ m، وتعتبر من الدرجة **I**.

3 - 8 - 3 - الخواص الجيوتكنيكية التصميمية لتربة العنصر المضاد للرشح:

يستعمل في تنفيذ العنصر المضاد للرشح مواد ترابية ناعمة، سيلتية أو غضارية، ذات عامل نفاذية تتراوح قيمته بين $(10^{-8} < K < 10^{-3})$ cm / sec وبحيث يكون حد السيولة للغضار أو السيلت المستخدم أكبر من **(50 %)**. وبشكل عام تكون تربة العنصر المضاد للرشح ذات حبيبات قطرها $(d \le 1$ mm$)$.

ويجب أن تكون التربة المستخدمة من الأصناف التالية [1]، [2]، [42]:

- بحص غضاري **(GC)** بنسبة غضار وسيلت أكبر من **(12 %)**.
- بحص سيلتي **(GM)** بنسبة غضار وسيلت أكبر من **(12 %)**.
- رمل غضاري **(SC)** بنسبة غضار أكبر من **(12 %)**.
- رمل سيلتي **(SM)** بنسبة مواد ناعمة أكبر من **(12 %)**.
- سيلت غير عضوي **(ML)** حد سيولته أقل من **(50 %)** ودليل اللدونة $(I_p > 7)$.
- غضار غير عضوي **(CL)** حد سيولته أكبر من **(50 %)**.
- غضار عالي اللدونة **(CH)** حد سيولته أكبر من **(50 %)**.
- سيلت عالي اللدونة **(MH)** حد سيولته أكبر من **(50 %)**.

علماً أن الأنواع الأربعة الأولى تحتاج إلى معالجات مختلفة تبعاً لارتفاع السد ومقدار التخزين والتسرب المتوقع عبر جسم السد وفي حال توفر تربة من أحد النوعين الأخيرين **(CH , MH)** في موقع إنشاء السد أو في مكان قريب منه يفضل استبعاد الأنواع الأخرى [42].

ومن خلال معرفة حدي السيولة واللدونة ودليل اللدونة والرطوبة الطبيعية لتربة النواة يمكن إيجاد الرطوبة المثالية (رطوبة بروكتور) W_{opt} وهي الرطوبة التي تعطي عندها التربة أكبر كثافة ممكنة عند ردمها ورصها في جسم السد، ويمكن حسابها من العلاقة [1]، [2]، [42]:

$$W_{opt} = W_p - (2 \div 4)\%$$

ومن أجل تخفيض قيمة الضغط المسامي في جسم النواة يفضل تخفيض هذه الرطوبة بمقدار **(1 %)** إلى ما يسمى بالرطوبة التصميمية W_d:

$$W_d = W_{opt} - 1\%$$

وإذا كانت الرطوبة الطبيعية للتربة المستخدمة أكبر من الرطوبة التصميمية يجب اللجوء إلى تجفيف التربة المردومة في جسم النواة للوصول إلى الرطوبة المطلوبة.

وبالنسبة لتربة جسم السد يمكن حساب معامل التسرب K_P (عامل النفاذية K_T) من العلاقة التالية مقدراً بـ

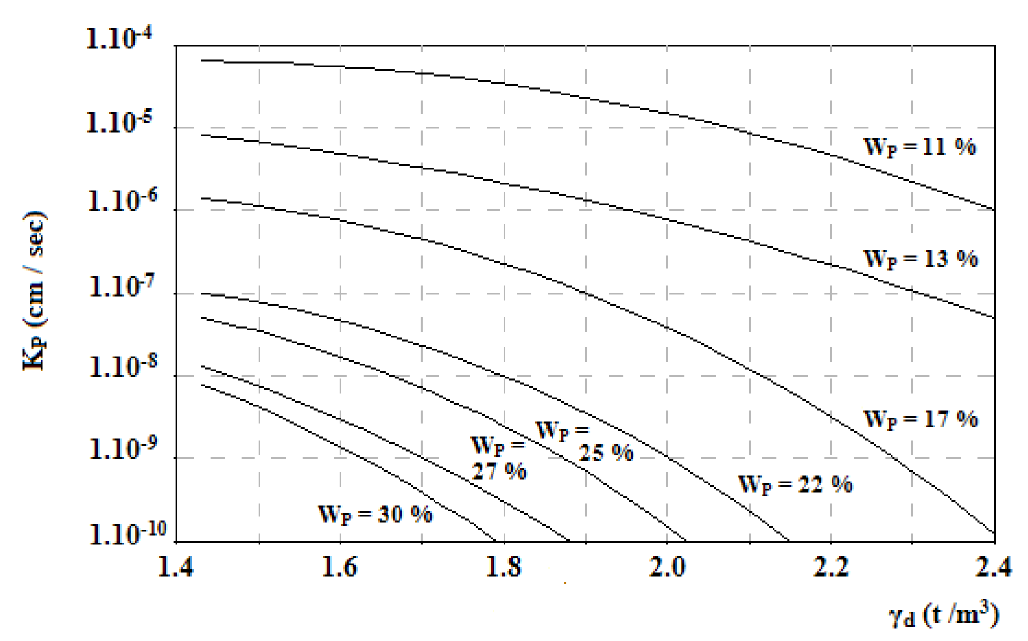


$$K_P = 4\times10^{-11}\times e\times W_P \frac{e}{0.17\times e_L - 0.048}$$

حيث: e_L هو معامل المسامية من أجل رطوبة حد السيولة ويعطى بالعلاقة:

$$e_L = 1.06\times\frac{G_S}{\gamma_W}\times W_L$$

حيث **(1.06)** هو ثابت تصحيح لحجم الفراغات الهوائية في التربة، وتعتبر العلاقة السابقة صحيحة إذا كانت نسبة حبات التربة التي قطرها **(d < 1 mm)** تتراوح بين **% (40 - 35)**، وفي حال لم تحقق التربة المستخدمة هذا الشرط يمكن إيجاد معامل التسرب بناءً على قيمة حد اللدونة وقيمة الوزن الحجمي الجاف مقدراً بـ **(t / m^3)** من المنحنيات المبينة في الشكل (3 - 34):



!!>2@ !ŒŒ! !Œ! ! !! !!!!!! !! !!Œ ! !!!!! !! !!Œ¼de!! ƒ!!!34!! 3!!¾! !Œ

ونبين فيما يلي أبعاد العنصر المضاد للرشح (نواة - شاشة) وذلك تبعاً لاشتراطات الكود الروسي لتصميم المنشآت المائية [1]، [2]، [42]:

- سماكة النواة المركزية من الأسفل لا تقل عن **(0.3 - 0.5)** من قيمة ارتفاع جسم السد H_D.
- سماكة النواة المائلة من الأسفل لا تقل عن **(0.2 - 0.4)** من قيمة ارتفاع جسم السد H_D.
- سماكة الشاشة لا تقل عن **(0.1 - 0.3)** من قيمة ارتفاع جسم السد H_D.

حيث تتوافق القيم الكبيرة مع السدود العالية.

3 - 8 - 4 - التسرب في السدود الترابية:

يحصل التسرب تحت المنشأة أو بداخلها أو في مكان اتصالها مع الجوانب تحت تأثير الضاغط الناتج عن الاختلاف في منسوب المياه أمام وخلف المنشأة، ومن المعروف بأن سرعة التسرب عبر وسط ترابي تتبع إلى عامل النفاذية فكلما ازدادت قيمته كلما ازدادت كمية التسرب وبالتالي القوى الناجمة عنها كقوة الضغط الشاقولي، وقوى الرشح الحجمية (القوى الهيدروديناميكية) والتي تحاول تحريك التربة في اتجاه حركة الماء مما يؤدي إلى إضعافها وزيادة عامل نفاذيتها [1]، [2].

وعندما تكون المنشأة مؤلفة من تربة نفوذة (سد ترابي) فإن تيار التسرب فيها يصبح غير مضغوط، أي يصبح سطح الماء لهذا التيار حراً ويدعى السطح العلوي في المقطع العرضي للسد بخط الإشباع.



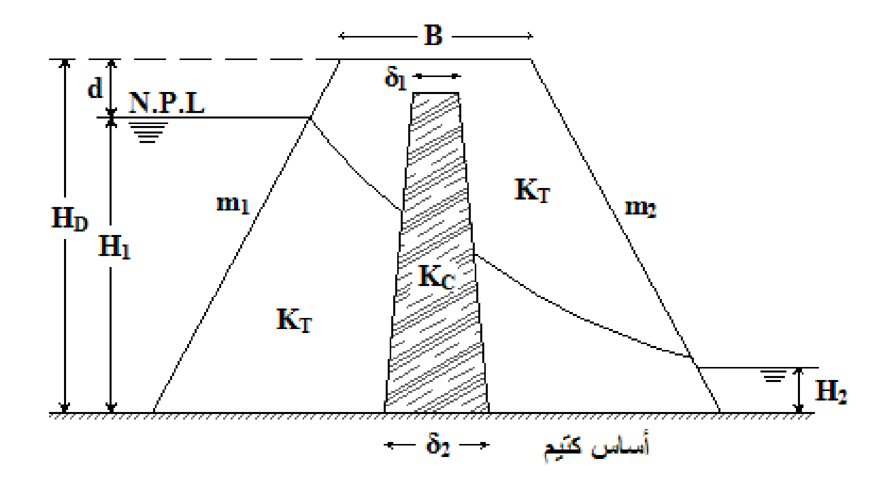
إن مسألة دراسة التسرب في السدود الترابية ضرورية جداً بسبب تأثير التسرب على استقرار الوجه الخلفي للسد وعلى توازن المنشأة بشكل عام [1]، [2].

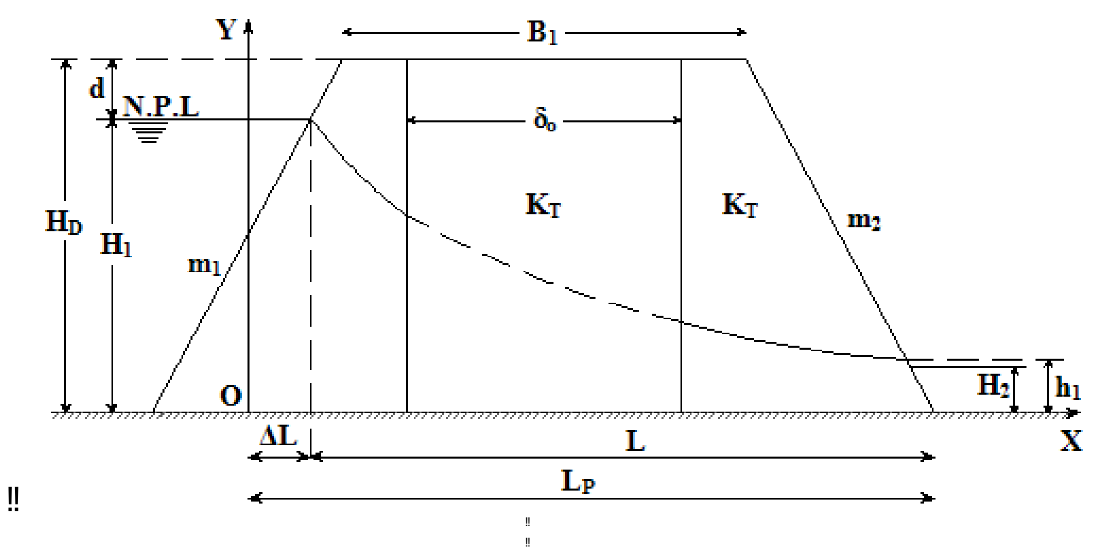
3 - 8 - 4 - 1 - تعيين عناصر التسرب (السرعة، التدارج، التدفق):

تتلخص مسألة حساب التسرب في السدود الترابية في تحديد موضع منحني أو خط الإشباع، وتحديد تصريف الماء المتسرب وسرعة وتدارج الضغط (العلو الهيدروليكي) في أي نقطة من نقاط منطقة التسرب. ولم يتم التوصل إلى حلول هيدروديناميكية دقيقة لمسائل التسرب في معظم حالات التطبيقات العملية لتصميم السدود الترابية، وقد وضع الباحث بافلوفسكي الطرق التصميمية الهيدروليكية التي تساعد في رسم خط الإشباع وتحديد كمية التدفق المتسرب [2]، [42].

3 - 8 - 4 - 2 - حساب التسرب في سد ترابي مع نواة مركزية على أساس كتيم استناداً إلى طريقة الباحث بافلوفسكي (1982):

تتم دراسة التسرب في السدود الترابية المتجانسة مع نواة بالاعتماد على طريقة الافتراض وذلك باستبدال الجدار الجوفي للسد بطبقة ترابية افتراضية ذات عامل نفاذية يساوي عامل نفاذية تربة جسم السد، ونبين فيما يلي خطوات الحل [2]، [42]:





!!

!!≥2@ƒ!!!! de!!! !! !! ƒ! ! ! ! !!Œ!! ! !!! !Œ!!! !! !!! ! ! !!Œ! Œ!! ! ! ! !!!!35! 3!!¾! !Œ

!!



1. نوجد السماكة الوسطية للنواة الغضارية: $\delta_C = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$

حيث: δ_1 ، δ_2 عرض النواة من الأعلى والأسفل على التوالي.

2. نحدد عرض الطبقة الافتراضية بالعلاقة: $\delta_O = \delta_C \frac{K_T}{K_C}$

حيث: K_T ، K_C: عاملا النفاذية لتربة جسم السد وتربة النواة على التوالي.

3. نرسم شكل السد بعد التعويض عن عرض القمة بما يعادلها: $B_1 = B + \delta_O - \delta_C$

4. نحسب h_1 وهو ارتفاع نقطة خروج خط الإشباع على المنحدر الخلفي عن القاعدة ويعطى بالعلاقة: $h_1 = \frac{L_P}{m_2} - \sqrt{(L_P / m_2)^2 - (H_1 - H_2)^2} + H_2$ ، وفي حال عدم وجود ماء خلف السد يكون المقدار $(H_2 = 0)$.

حيث: m_1 ، m_2: ميل المنحدر الأمامي والخلفي على التوالي.

H_1 ، H_2: ارتفاع الماء أمام وخلف المنشأة على التوالي.

L_P: العرض المكافئ للسد عند القاعدة ويعطى بالعلاقة:

$$L_P = \Delta L + L$$

$$L = m_1.d + B_1 + m_2(H_1 + d)$$

$$\Delta L = 0.4 \times H_1$$

حيث: ΔL: بعد محور الإحداثيات **OY** عن الشاقول المار من نقطة تقاطع منسوب الماء في البحيرة مع المنحدر الأمامي للسد.

5. حساب مقدار التدفق عبر جسم السد من العلاقة: $q_T = K_T \frac{H_1^2 - h_1^2}{2(L_P - m_2.h_1)}$

وسنورد لاحقاً مثالاً تطبيقياً يوضح طريقة حساب التسرب في أحد السدود الترابية المنفذة في سوريا.

!!

3 - 8 - 4 - 3 - المنشآت الملحقة بالسد الترابي لتنظيم مقدار الماء الراشح (المتسرب):

تهدف هذه المنشآت إلى تنظيم مقدار الماء المتدفق أو المتسرب عبر جسم السد والنواة الغضارية وتنظيم منحني الارتشاح (خط الإشباع) وبالتالي زيادة مقاومة النواة الغضارية لتشوهات الارتشاح والاجتراف التلامسي بتأثير تيار الماء الراشح، وتظهر أهمية هذه المنشآت الملحقة بالسد الترابي أو الركامي إذا علمنا أن **(80 %)** من حالات انهيار السدود الترابية أو الركامية الحاوية على نواة غضارية ناتج عن انجراف تربة النواة بتأثير تيار الماء الراشح عبرها (اريستوفسكي **1982**) [42]، ونذكر من هذه المنشآت:

أولاً: المرشحات المقلوبة (الفلاتر العكسية): [2]، [42] هي مجموعة طبقات تساهم في وقاية تربة العنصر المضاد للرشح من تشوهات الارتشاح الناجمة عن حركة التيار الرشحي ويتم إنشاء هذه المرشحات من طبقات تربة غير متماسكة ذات حجوم حبيبية مختلفة، ويتراوح عدد الطبقات بين طبقة واحدة وثلاث طبقات مرتبة بصورة عمودية على اتجاه تيار الماء الراشح، ويمكن أن تتواجد هذه المرشحات على جوانب مواشير الصرف وعلى جوانب العنصر المضاد للرشح في جسم السد الترابي (نواة - شاشة).

ثانياً: مصارف الماء في السدود الترابية: [2]، [42] يتم إنشاء المصارف المائية بهدف تنظيم الارتشاح عبر جسم السد وتصريف المياه الراشحة بطريقة تمنع حدوث تشوهات الارتشاح.

وتتألف مصارف الماء عادةً من قسمين: قسم الصرف وقسم الترشيح أي المرشح الذي يتألف عادةً من طبقتين أو ثلاث طبقات، ويحدد الارتفاع الأصغري لموشور الصرف بالارتفاع الأعظمي للماء خلف السد (لا يقل عن h_1).



الفصل الرابع ...

!!

التجارب المخبرية وتجهيزات البحث



4- 1- مقدمة:

من خلال مراجعة العديد من الأبحاث [20]، [30]، [36]، [43]، [44] التي تناولت دراسة نفاذية الترب الانتفاخية والعوامل المؤثرة عليها تبين أن هذه الأبحاث اقتصرت على إيجاد علاقات تجريبية لتحديد قيمة عامل النفاذية بدلالة الوزن الحجمي الجاف للتربة أو بدلالة حد السيولة أو معامل المسامية أو الضغط الخارجي المطبق على التربة وغيرها من المتغيرات الأخرى دون الأخذ بعين الاعتبار تأثير ضغط الانتفاخ الذي يتبع بشكل رئيسي للرطوبة البدائية للتربة المدروسة والوزن الحجمي الجاف ونسبة المواد الناعمة، وقد ساعدتنا النتائج المستقاة من هذه الأبحاث على فهم آلية انتفاخ التربة والعوامل المؤثرة على نفاذيتها وبالتالي استطعنا وضع مخطط العمل التجريبي لبحثنا بحيث تم التركيز على دراسة ضغط انتفاخ التربة كنتيجة حتمية لعوامل الانتفاخ المختلفة وتأثيره على عامل النفاذية وذلك من خلال إجراء تجارب التشديد على الترب المدروسة في حالتين:

- الحالة الأولى: السماح للعينات بالانتفاخ الشاقولي.
- الحالة الثانية: تطويق الانتفاخ الشاقولي للعينة المدروسة.

ثم تمت المقارنة بين قيم عوامل النفاذية في الحالتين للوصول إلى هدف البحث.

يتضمن هذا الفصل توصيف الترب الثلاث المدروسة والتجارب المخبرية التي أجريت على هذه الترب والطرق المتبعة في البحث وإجراء التجارب، مع شرح مفصل للتجهيزات المستخدمة في تطويق الانتفاخ الشاقولي للعينات المدروسة والتطبيقات العملية لتجارب التطويق.

4- 2- مخطط العمل التجريبي:

يبين الشكل (4 - 1) مراحل إجراء التجارب على كل تربة من الترب المدروسة، حيث تم إجراء التجارب التالية:

4 - 2 - 1 - تجارب تحديد الخواص الفيزيائية وخواص اللدونة للتربة:

وهي سلسلة التجارب المخبرية المستخدمة في توصيف الترب بشكل عام وتحديد خواصها الفيزيائية وهي تضم: تجربة الرطوبة الطبيعية، تجربة تحديد الوزن الحجمي الرطب، تجربة تحديد الوزن النوعي، تجارب التحليل الحبي (باستخدام المناخل وبالترسيب)، كما تم إجراء تجارب أتربرغ لتحديد حدي السيولة واللدونة، حيث يمكن بناءً على نتائج هذه التجارب تصنيف التربة وفق مخطط كاساغراندي لتصنيف الترب الناعمة.

!!
!!
!!
!!
!!
!!
!!
!!
!!
!!
!!

3 | 2 | 3 | 2

$$K = f(W_n , \sigma)$$

$$K = f(\sigma_{sw} , W_n , \sigma)$$

4 - 2 - 2 - تجارب دراسة الانتفاخ ونفاذية التربة:

تم إجراء تجارب تحديد ضغط الانتفاخ لكل تربة من الترب المدروسة باستخدام جهاز الآدومتر واعتماداً على طريقة نظام الـ **ASTM** وهي الطريقة الأكثر شيوعاً في بلادنا لتحديد ضغط الانتفاخ ودراسة تغيراته تبعاً لتغير رطوبة التربة وتغير الوزن الحجمي الجاف.

أجريت المجموعة الأولى من التجارب عند الرطوبة الطبيعية للتربة وهي تجارب أولية تم إجراؤها لتحديد قيمة ضغط الانتفاخ للتربة المدروسة بهدف تصنيفها تبعاً لقابليتها للانتفاخ.

المجموعة الثانية من التجارب أجريت عند الرطوبة الطبيعية للتربة من أجل دراسة نفاذيتها اعتماداً على نتائج تجربة التشديد ورصد تشوهات التربة مع الزمن عند تطبيق حمولات متزايدة على التربة وتم حساب قيمة عامل النفاذية باستخدام طريقة جذر الزمن لتايلور عند كل مرحلة من مراحل التحميل.
تجارب المجموعة الثالثة أجريت على عينات من الترب الثلاثة مجففة طبيعياً إلى رطوبة أدنى من رطوبتها الطبيعية، حيث تم تحديد قيمة عامل النفاذية بنفس الطريقة.

تجارب المجموعة الرابعة أجريت على عينات مجففة طبيعياً إلى رطوبة أدنى من رطوبة عينات المجموعة الثالثة وتم تحديد قيمة عامل النفاذية بنفس الطريقة أيضاً.

انتفاخ التربة شاقولياً ودراسة نفاذية التربة:



أجريت هذه التجارب بالتوازي مع التجارب السابقة وذلك كما يلي:

من أجل كل مجموعة من التجارب قمنا بوضع عينتين متماثلتين من حيث الرطوبة والوزن الحجمي الرطب والجاف حيث تم السماح للعينة الأولى بالانتفاخ في حين تم تطويق انتفاخ العينة الثانية، وبعد استقرار انتفاخ العينة الأولى قمنا بتحميل العينتين معاً في وقت واحد وبنفس الحمولات المتزايدة ولنفس الفترة الزمنية حيث تم رصد تشوه كل من العينتين مع الزمن وتحديد قيمة عامل نفاذية التربة باستخدام طريقة جذر الزمن لتايلور.

وقد تم تطويق انتفاخ العينات شاقولياً من خلال استخدام علبة تشديد خاصة لها غطاء معدني يمنع التربة من الانتفاخ شاقولياً ، حيث يتم وضع العينة ضمن حلقة التشديد وتوضع الحلقة بين قرصين مساميين علوي وسفلي للسماح بمرور الماء من العينة وإليها، ثم يتم إغلاق الغطاء المعدني بإحكام حيث يمنع هذا الغطاء مؤشر قياس التشوهات من الارتفاع وبالتالي لا يمكن قراءة تشوهات الانتفاخ.

4-3- توصيف الترب المدروسة:

تم اختيار ثلاثة مواقع مختلفة أخذت منها عينات الترب المدروسة، وقد تم انتقاء ثلاثة ترب مختلفة في قابليتها للانتفاخ بحيث تكون إحداها ذات قابلية انتفاخ منخفضة وأخرى متوسطة الانتفاخ والثالثة عالية الانتفاخ، وجميع العينات المدروسة عبارة عن عينات سليمة غير مخربة **(Undisturbed samples)** تم استخراجها بواسطة السابرة وقد تم تغليف العينات فور استخراجها بالشمع **(Wax)** وذلك لضمان استقرار خصائصها الطبيعية وأهمها الرطوبة ريثما يتم نقلها إلى المختبر.

وأما الغرض من العينات السليمة فهو دراسة الخصائص الميكانيكية للتربة بتركيبها ووضعها الطبيعيين من خلال تجارب الانضغاطية **(Consolidation)** والنفاذية **(Permeability)** وغيرها.

وقد تم اختيار الترب المدروسة وفق قابليتها للانتفاخ على النحو التالي:

1. التربة الأولى ذات الانتفاخ المنخفض من تربة مشروع مطار حماة وهي ناعمة حمراء اللون، العينات المدروسة يتراوح عمقها بين **m (1.5 - 2.5)**.
2. تم الحصول على التربة الثانية ذات الانتفاخ المتوسط من قرية تارين في محافظة حماة وهي ناعمة حمراء اللون ويتراوح عمق العينات المدروسة بين **m (2 - 3.5)**.
3. التربة الثالثة ذات الانتفاخ العالي تم الحصول عليها من محيط قرية زيزون في مدينة حماة وهي ناعمة ذات لون بني قاتم والعينات المدروسة يتراوح عمقها بين **m (15 - 16)**.

بعد إحضار العينات إلى مخبر كلية الهندسة المدنية في جامعة البعث تم إجراء التجارب الخاصة بتحديد المواصفات الفيزيائية ومواصفات الانتفاخ للترب المدروسة من أجل تحديد نوع كل تربة من حيث قابليتها للانتفاخ، ونبين في الجداول التالية مواصفات الترب الثلاث:

الجدول (4-1): الخواص الفيزيائية للترب المدروسة

!! deŒŽ!Œ!! ! e_o (%)! ƒ! ƒ!! !Œ	!!! ! ! !!Œ!! !Œ!! Gs	deŒ!! š!Œ!! !Œ!! γ_d (KN/m^3)	!! ! !!Œ!! š!Œ!! !Œ!! γ_b (KN/m^3)	! ƒ! ƒ!! !Œ!! ! ! !Œ W_n (%)	!! !! !!Œ!! ! !! !!!!!Œ
86.40	2.68	14.40	17.80	23.80	!deš!! de!! !! !! !
88.10	2.85	15.10	19.00	25.50	! ƒ! de! ƒ! !
102.50	2.89	14.30	18.30	27.90	! ! ! ƒ! ! ƒ! !! ƒš!

!!! ! ! !!!!Œ ! !!Œ ƒ!! !! !! !! !!!Œ Œ !!!2! 4!!¾!! !Œ

!! !!Œ dede! ! ! ! !ž !! !! ƒ!! !!Œ !!! deŒ ! !!Œ ƒ!! !!	!! !! !!!Œ¼ƒ! I_P (%)	!! !! !!!Œš W_P (%)	!! !! ƒ! !Œš W_L (%)	!! !! !!Œ!! ! !! !!!!!Œ
CL !!! !!!Œ Ž! !!!! de!	28.9	29.1	58	

CH !!!!!!Œ!œ!!œ!	32.5	31.0	63.5	! ƒ!œ! ƒ!!
CH !!!!!!Œ!œ!!œ!	45.0	33.0	78.0	!!!ƒ!!ƒ!!! ƒS!

USCS!!!!!!Œ ƒ!! !!!!š!!!Œ!!!!!Œ̆ !!!!! !!!!!Œ!!!!!! œš!Œ œœ!!!!!! !!!!3!! 4!!¾!! !Œ

!!!!!!Œ!!!	!!! !Œ!Œ!Œ!! !		!!! œŒŒ!Œ!! !	
!!!!!!Œ	! š!!Œ!! !	¾!!Œ!! !	! !ƒ !Œ!! !	2 µm!!! !!Œ!! !! œ!!Œ!! !
!œš!!œ!!!!!!	9.72 %	17.17 %	44.31 %	28.80 %
	26.89 %		73.11 %	
! ƒ!œ! ƒ!!	5.76 %	13.13 %	46.81 %	34.30 %
	18.89 %		81.11 %	
!!!ƒ!!ƒ!!! ƒS!	1.20 %	11.47 %	26.53 %	60.80 %
	12.67 %		87.33 %	

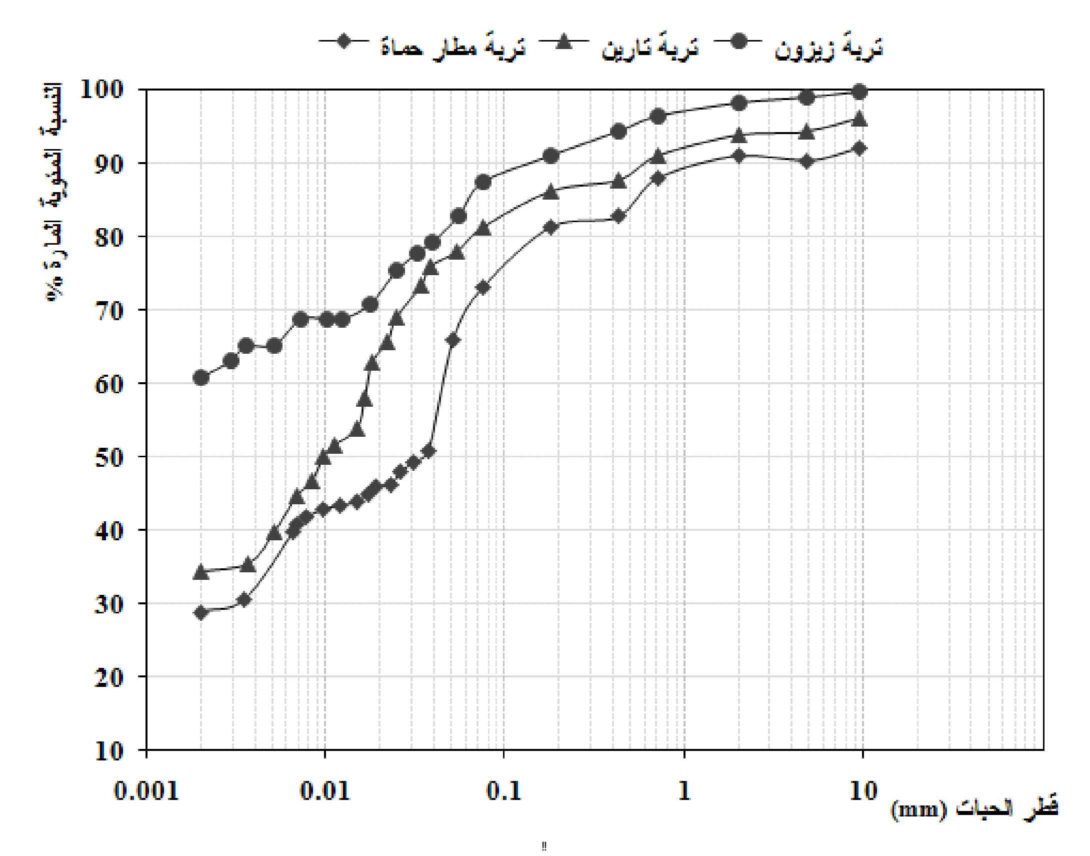
ونبين في الشكل (4 - 3) منحنيات التركيب الحبي للترب المدروسة.

وبناءً على المواصفات والخواص السابقة، واستناداً إلى طرق تصنيف الترب الانتفاخية المعروضة في الفصل الثاني (الفقرة 2 - 5)، نبين في الجدول (4 - 4) تصنيف الترب المدروسة تبعاً لقابليتها للانتفاخ:

الجدول (4- 4): إمكانية انتفاخ الترب المدروسة وفقاً للطرق المعروضة في الفصل الثاني

!!ƒ!!!œ!!! œ̆!!! Œƒœ!	!œš!!œ!!!!!	! ƒ!œ!!!	!!!ƒ!!!!!
Altmeyer	!! Ž!!!	!! Ž!!!	!! Ž!!!
Rangaratham & Satyanarayana	! ƒ!œ	! ƒ!œ	! ƒ!œ
Snethen	!!!!!	!!!!!	Œ!! ƒ!œ
Seed (1)	!!!!!	!!!!!	! ƒ!œ
!!!!!!Œ!!!(!!SNIP	!! Ž!!!	!!!!!	! ƒ!œ
BRE	!!! Ž!!!	!!!!!	! ƒ!œ
Chen	! ƒ!œ	! ƒ!œ	Œ!! ƒ!œ
Seed (2)	!!! !!!	!!! !!!	! ƒ!œ
Holtz & Gibbs	!!!!!	!!!!!	! ƒ!œ
Dakshhanamurthy & Raman	!!!!!	!!!!!	! ƒ!œ
Donaldson & Williams	!! Ž!!!	!!!!!	! ƒ!œ





الشكل (3-4): منحنيات التحليل الحبي للترب المدروسة

نشير إلى أن حد التقلص المستخدم لتصنيف انتفاخية التربة وفقاً لبعض الطرق قد تم حسابه رياضياً اعتماداً على علاقة **(Holtz & Kovaes 1981)** [19] التي تعطي حد التقلص كتابع لحد السيولة W_L ودليل اللدونة I_P:

$$W_S(\%) = 46.38 \times \frac{W_L + 43.53}{I_P + 46.38} - 43.53$$

نلاحظ من الجدول السابق أن طرق التصنيف السابقة لم تعطِ نفس إمكانية الانتفاخ للترب المدروسة إلا أنها اتفقت على إمكانية انتفاخ هذه الترب، كما يتبين لنا بأن العوامل المسيطرة على السلوك الانتفاخي للترب الانتفاخية هي حد السيولة W_L، دليل اللدونة I_P، وحد التقلص W_S إضافة إلى نسبة الغضاريات في التربة المدروسة، ونجد أيضاً من النتائج السابقة أن بعض هذه الطرق كطريقة **Altmeyer** وطريقة **Rangaratham & Satyanarayana** غير ملائمة لتصنيف الترب المحلية وذلك من خلال مقارنة نتائج هاتين الطريقتين مع نتائج باقي الطرق.

وبإجراء تقييم عام للتصانيف الواردة في الجدول السابق يمكن تصنيف الترب المدروسة في بحثنا تبعاً لانتفاخها كما يلي:

!œ œž!!Œƒœ! !œ! !!! !!!!!Œ !!!Œ ƒ! !!!!5!! 4!!¾!! !Œ

œ œž!!Œƒœ!	!! !!!!!Œ!! !!Œ!!!
!!! !!!!! !!!!! Ž! !!	!œš!! œ!! !!!! !
! ƒœ!! !!!!! ! !!!	! ƒ! œ! ƒ! !
Œ!! ƒœ!! !!!! ƒœ	!!! ƒ!!! ƒ!!! ƒš!

ـسة الانتفاخ ونفاذية الترب المدروسة:



تمت دراسة ثلاث عينات مختلفة الرطوبة من كل نوع من أنواع الترب المدروسة (كما ذكرنا سابقاً) ومن أجل كل عينة تم تحديد ضغط الانتفاخ وحساب عوامل النفاذية عند كل إجهاد من الإجهادات الشاقولية المطبقة على العينة حيث تم استخدام حلقة تشديد نظامية ارتفاعها **(20 mm)** ومساحة سطحها **($40\ cm^2$)** وحجمها **($80\ cm^3$)** ، ونبين فيما يلي نتائج التجارب التي أجريت على الترب الثلاث:

4 - 4 - 1 - التربة ضعيفة الانتفاخ (تربة مشروع مطار حماة):

- العينة الأولى: رطوبتها هي الرطوبة البدائية للتربة المدروسة، خواصها مبينة فيما يلي:

الجدول (4-6): مواصفات العينة الأولى - التربة ضعيفة الانتفاخ

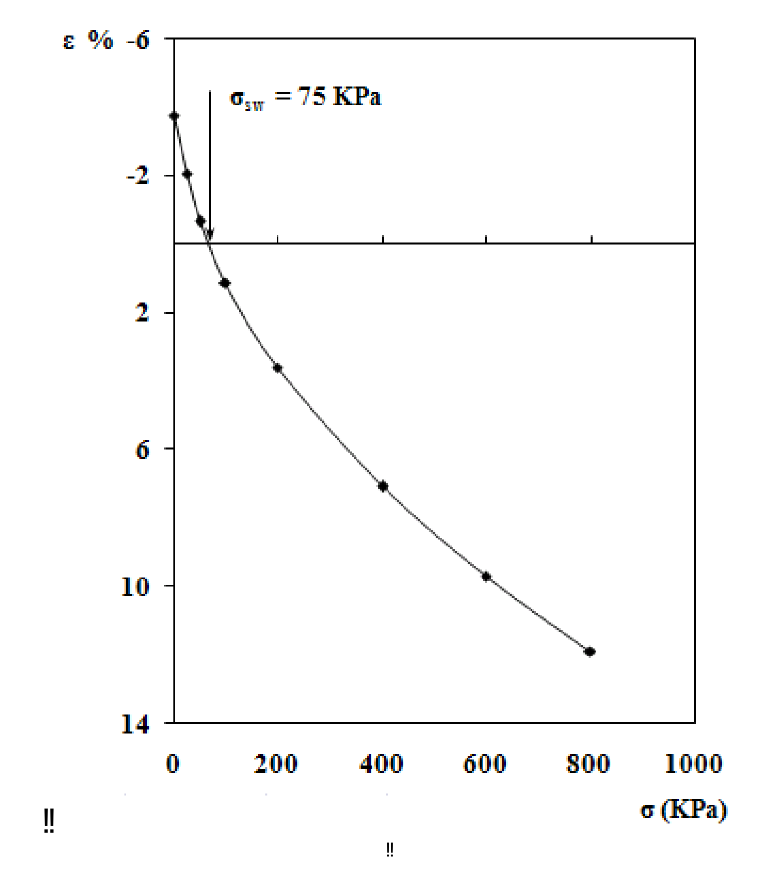
17.8	γ_b (KN/m^3)	23.8	(W %)
14.4	γ_d (KN/m^3)	73.7	Sr (%)
2.0	H_o (cm)	86.4	e_o (%)

وبتمثيل العلاقة بين التشوه النسبي والإجهاد المطبق على العينة، الشكل (4 - 4)، يتم حساب ضغط الانتفاخ للعينة المدروسة **(σ_{sw} = 75 KPa)**، كما يبين الجدول (4 - 7) نتائج دراسة نفاذية العينة المدروسة وطريقة حساب عوامل النفاذية باستخدام طريقة لوغاريتم الزمن لكاساغراندي:

الجدول (4-7): نتائج دراسة نفاذية العينة الأولى - التربة ضعيفة الانتفاخ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	86.4	0
3.07×10^{-7}	4.18×10^{-7}	8.2	15.28	90.2	25
2.67×10^{-7}	3.74×10^{-7}	7.32	13.64	86.8	50
2.31×10^{-7}	3.69×10^{-7}	5.53	10.31	83.6	100
1.87×10^{-7}	3.29×10^{-7}	4.16	7.75	82.9	200
1.22×10^{-7}	2.78×10^{-7}	3.3	6.15	78.5	400
7.87×10^{-8}	2.65×10^{-7}	2.3	4.29	75.8	600
5.28×10^{-8}	2.51×10^{-7}	1.45	2.71	73.3	800





!!ž !! ! !Œœ ! Œ! !! !!Œ! ! !!Œ ƒ!! !! !!Œ4!! 4!!¾! !Œ

!!! œ!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ !! ! Œ! ƒ!!!! œ!!! Œ! ! !! œš

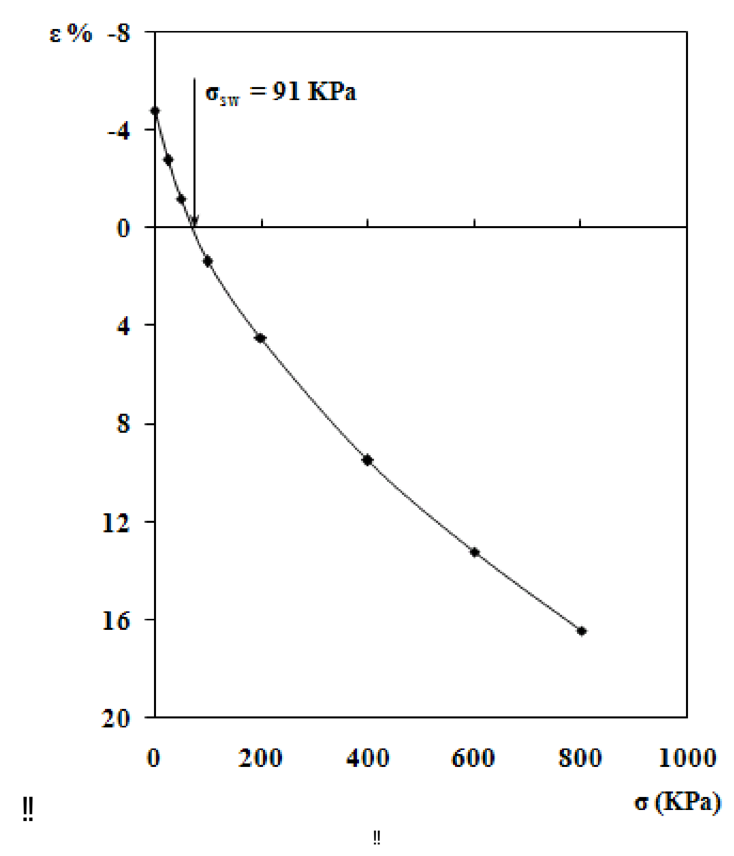
- العينة الثانية: رطوبتها أقل من رطوبة العينة الأولى وخواصها مبينة في الجدول (4 -8)، ونتائج دراسة نفاذية العينة مبينة في الجدول (4 - 9):

!!! œ!!! ŒŽƒ!! !!!! !!Œ! ƒœŒ! ƒ!Œ œ! Œ!!8!! 4!!¾!! !Œ

17.5	γ_b (KN/m^3)	20.5	(W %)
14.5	γ_d (KN/m^3)	64.6	Sr (%)
2.0	H_o (m)	84.8	e_o (%)

وبتمثيل العلاقة بين التشوه النسبي والإجهاد المطبق على العينة الشكل (4 - 5) يتم حساب ضغط الانتفاخ للعينة المدروسة وهو يساوي **(σ_{sw} = 91 KPa)**.





!!ž !! !!ŒŒœ ! Œ! !! !!Œ! ! !!Œ ƒ!!!! !!Œ5!! 4!!¾! !Œ
! œ̌!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ ƒ!œŒ!ƒ!!!! œ̌!! Œ!! !! œš

!! œ̌!! ŒŽƒ!! !!!! !!Œ! ƒ!œŒ!ƒ!Œƒ!œ̌!!! Œ!! !œ!!9!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	84.8	0
2.55×10^{-7}	3.78×10^{-7}	7.18	13.38	88.2	25
2.34×10^{-7}	3.55×10^{-7}	6.18	11.52	85.3	50
2.08×10^{-7}	3.28×10^{-7}	5.38	10.03	81.7	100
1.45×10^{-7}	2.96×10^{-7}	5.02	9.35	78.5	200
9.02×10^{-8}	2.62×10^{-7}	3.12	5.81	74.8	400
6.34×10^{-8}	2.48×10^{-7}	2.25	4.23	72.4	600
4.02×10^{-8}	2.30×10^{-7}	1.41	2.63	69.1	800

- العينة الثالثة: رطوبتها أقل من رطوبة العينة الثانية وخواصها ونتائج دراسة نفاذيتها مبينة في الجدولين (4 -10)، (4 -11) على التوالي، ومن الشكل (4 - 6) نجد أن ضغط الانتفاخ للعينة المدروسة يساوي (σ_{sw} = 135 KPa).

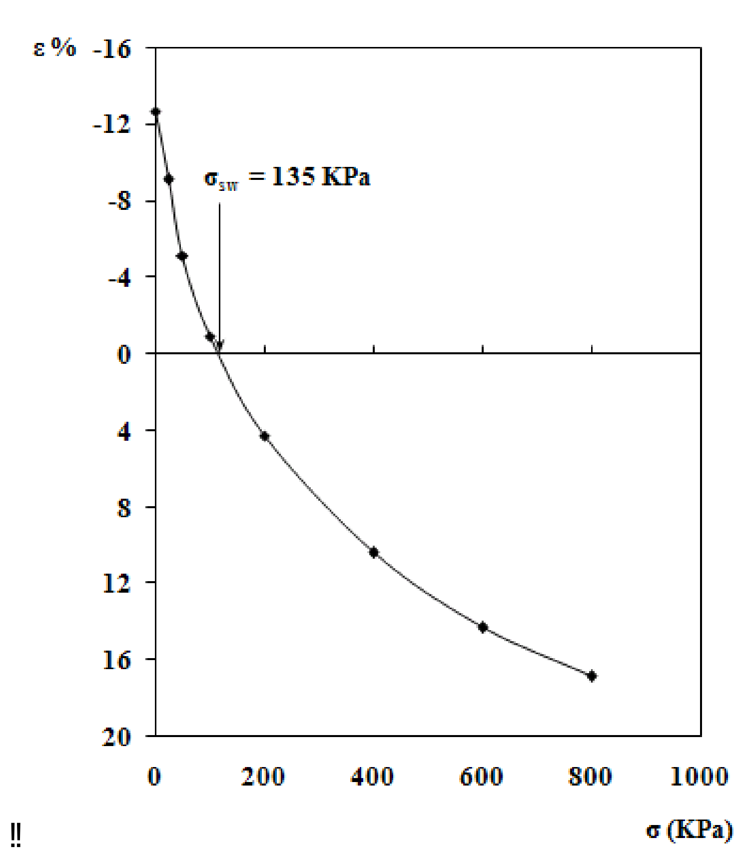


‼! ǽ!!! ŒŽƒ!! !!!! ‼Œ! !!œŒ! ƒ!!Œ ǽ! Œ!!10!! 4!!¾!! !Œ

17.4	γ_b (KN/m³)!! ! !!Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	17.8	(W %) ! ! ƒ! !Œ!! ! !
14.8	γ_d (KN/m³)!! œ!Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	58.7	Sr (%) !! œ ! Œ! ! !
2.0	H_o (m) !! !Œ!Œ! ƒ !Œ ǽ!! Œ	81.4	e_o (%) !! ƒ!ŒŒ œŒŽ!Œ!! !

‼! ǽ!!! ŒŽƒ!! !!!! ‼Œ! !!œŒ! ƒ!Œƒ ǽ!!!! Œ!! !œ!!11!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m²/ sec)	m_v (m²/ KN)	a_v (m²/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	81.4	0
1.92×10^{-7}	3.43×10^{-7}	6.48	12.08	84.4	25
1.63×10^{-7}	3.27×10^{-7}	5.88	10.95	81.6	50
1.42×10^{-7}	2.91×10^{-7}	4.64	8.65	78.3	100
9.95×10^{-8}	2.67×10^{-7}	3.8	7.08	74.1	200
7.86×10^{-8}	2.41×10^{-7}	2.64	4.92	72.7	400
4.39×10^{-8}	2.08×10^{-7}	1.77	3.3	69.0	600
2.58×10^{-8}	1.89×10^{-7}	0.73	1.36	67.3	800



‼ž !! ! !Œœ ! Œ! !! !!Œ! ! !!Œ ƒ!!!! !!Œ6!! 4!!¾! !Œ

‼! ǽ!!! ŒŽƒ!! !Œ!! ‼Œ! !!œŒ! ƒ!!!! ǽ!!! Œ!! !! œ

نلاحظ من النتائج السابقة أن قيمة عامل النفاذية تنخفض بزيادة الضغط الشاقولي المطبق على العينة نتيجة انضغاط التربة حيث يتناقص حجم الفراغات التي تسمح للماء بالجريان عبرها.
كما نلاحظ أنه مع تناقص الرطوبة البدائية ومع ازدياد ضغط انتفاخ العينة تتناقص قيم عامل النفاذية والسبب في ذلك يعود إلى انتفاخ التربة نتيجة غمرها بالماء وبالتالي انخفاض حجم الفراغات الحرة التي يمكن للماء الجريان عبرها، **إلا أن نسبة تناقص قيمة عامل النفاذية تعتبر ضئيلة نظراً لأن قيم عامل النفاذية للترب الغضارية صغيرة مقارنة مع أنواع الترب الأخرى، وبالتالي نجد أن تأثير ضغط الانتفاخ على قيمة عامل النفاذية للترب الغضارية الضعيفة الانتفاخ محدود نسبياً.**

4 - 4 - 2 - التربة متوسطة الانتفاخ (تربة تارين):

- العينة الأولى: رطوبتها هي الرطوبة البدائية للتربة المدروسة:

!!! ǣ!!! Œ! ! !!!!!!!!Œ! !!! Œ!ƒ!Œ ǣ! Œ!!12!! 4!!¾!! !Œ

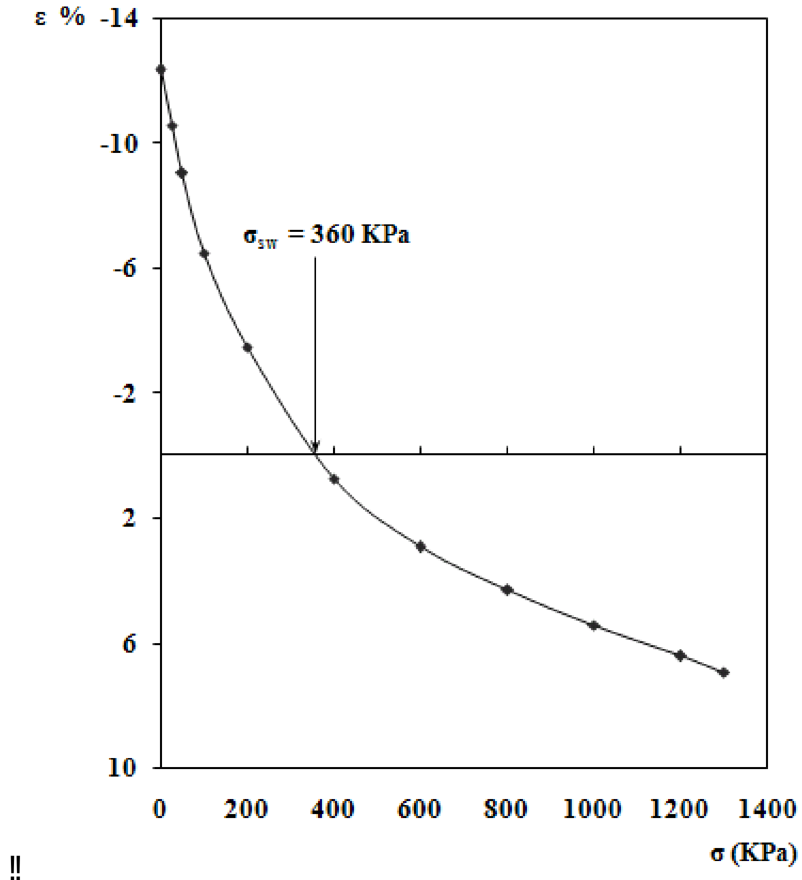
19.0	γ_b (KN/m^3)	25.5	(W %)
15.1	γ_d (KN/m^3)	82.3	Sr (%)
2.0	H_o (m)	88.1	e_o (%)

!!! ǣ!!! Œ! ! !!!!!!!!Œ !!! Œ!ƒ!Œƒǣ!!! Œ!! !œ!!13!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	88.1	0
8.92×10^{-8}	8.30×10^{-7}	10.76	20.24	94.2	25
8.47×10^{-8}	8.15×10^{-7}	9.53	17.93	90.7	50
7.91×10^{-8}	7.86×10^{-7}	8.13	15.3	86.1	100
7.53×10^{-8}	7.63×10^{-7}	7.64	14.4	81.6	200
6.88×10^{-8}	7.32×10^{-7}	6.13	11.53	77.5	400
6.36×10^{-8}	6.91×10^{-7}	5.47	10.3	74.9	600
5.83×10^{-8}	6.75×10^{-7}	4.38	8.24	70.3	800
5.37×10^{-8}	6.58×10^{-7}	3.65	6.87	67.4	1000
4.91×10^{-8}	6.31×10^{-7}	2.24	4.21	65.6	1200
4.68×10^{-8}	6.08×10^{-7}	1.87	3.52	62.8	1300

ويبين الشكل (4 - 7) طريقة حساب ضغط الانتفاخ للعينة المدروسة وهو يساوي **(σ_{sw} = 360 KPa).**





!!ž !! ! !Œde ! Œ! !! !!Œ ! !!Œ ƒ!!!! !!Œ7!! 4!!¾! !Œ

حساب ضغط الانتفاخ للعينة الأولى- التربة المتوسطة الانتفاخ

- العينة الثانية: رطوبتها أقل من رطوبة العينة الأولى ونتائج التجربة مبينة في الجداول التالية:

الجدول (4- 14): مواصفات العينة الثانية - التربة متوسطة الانتفاخ

18.7	γ_b (KN/m^3) !! ! ! !Œ !! š!Œ ! ! !Œ	22.3	(W %) ! !ƒ !Œ!! ! !
15.3	γ_d (KN/m^3) !! deŒ !! š!Œ ! ! !Œ	73.3	Sr (%) !! de ! Œ! !!
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ !Œ ož !! Œ	86.7	e_o (%) !! ƒŒŒ deŒŽ!Œ!! !

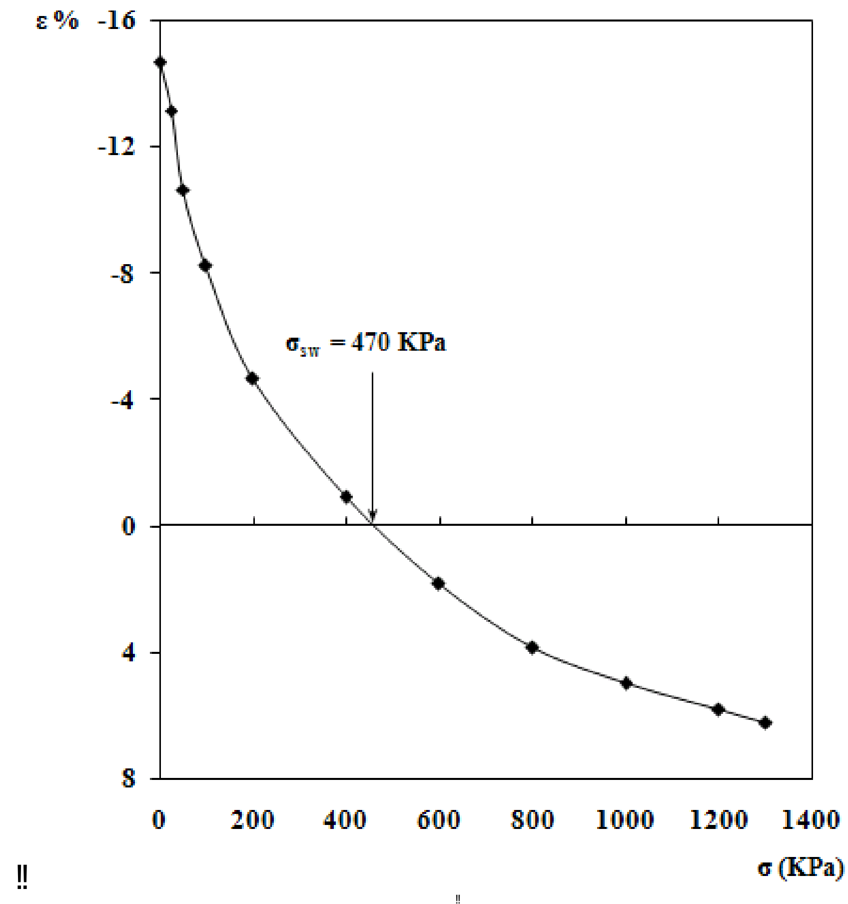
وبتمثيل العلاقة بين التشوه النسبي والإجهاد المطبق على العينة الشكل (4 - 8) يتم حساب ضغط الانتفاخ للعينة المدروسة ويساوي (σ_{sw} = 470 KPa).

الجدول (4- 15): نتائج دراسة نفاذية العينة الثانية - التربة متوسطة الانتفاخ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	86.7	0
8.19×10^{-8}	8.01×10^{-7}	10.22	19.08	92.3	25
7.43×10^{-8}	7.85×10^{-7}	9.51	17.75	90.7	50
6.82×10^{-8}	7.62×10^{-7}	8.86	16.54	86.8	100



6.24×10^{-8}	7.43×10^{-7}	8.31	15.51	83.2	200
5.31×10^{-8}	7.11×10^{-7}	7.47	13.95	78.8	400
4.45×10^{-8}	6.90×10^{-7}	6.72	12.55	73.9	600
3.62×10^{-8}	6.76×10^{-7}	5.84	10.9	69.5	800
3.01×10^{-8}	6.41×10^{-7}	4.52	8.44	66.1	1000
2.46×10^{-8}	6.13×10^{-7}	2.93	5.47	64.4	1200
1.97×10^{-8}	5.83×10^{-7}	1.63	3.04	61.6	1300



الشكل (4- 8): العلاقة بين التشوه النسبي والإجهاد المطبق
حساب ضغط الانتفاخ للعينة الثانية- التربة المتوسطة الانتفاخ

- العينة الثالثة: رطوبتها أقل من رطوبة العينة الثانية والنتائج مبينة في الجداول التالية، وضغط الانتفاخ للعينة المدروسة يساوي (σ_{sw} = 645 KPa) كما هو مبين في الشكل (4 - 9).

الجدول (4- 16): مواصفات العينة الثالثة - التربة متوسطة الانتفاخ

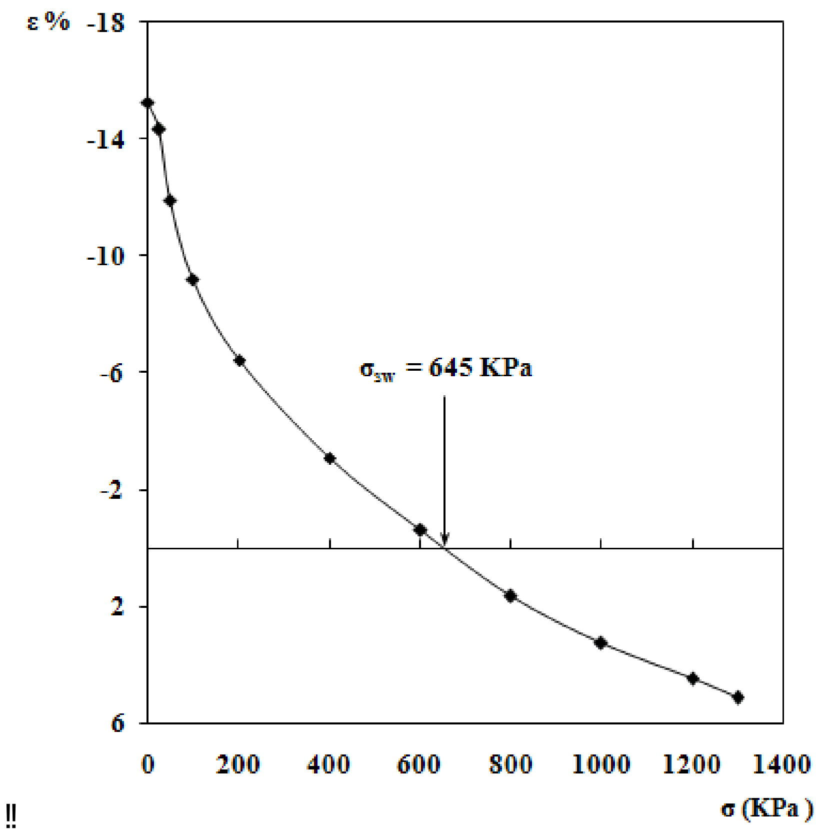
18.5	γ_b (KN/m^3)	19.1	(W %)
15.5	γ_d (KN/m^3)	64.7	Sr (%)
2.0	H_o (m)	84.0	e_o (%)



!!!!!œŒ!ƒ!Œƒ!œž!!!! Œ!! !œ!!17!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	84.0	0
7.34×10^{-8}	7.43×10^{-7}	9.88	18.18	88.5	25
6.72×10^{-8}	7.22×10^{-7}	8.72	16.04	86.8	50
6.05×10^{-8}	7.05×10^{-7}	7.90	14.54	83.4	100
5.28×10^{-8}	6.88×10^{-7}	7.11	13.08	79.2	200
4.33×10^{-8}	6.61×10^{-7}	6.74	12.40	77.1	400
3.17×10^{-8}	6.44×10^{-7}	5.87	10.80	73.8	600
2.39×10^{-8}	6.25×10^{-7}	5.05	9.30	68.7	800
1.94×10^{-8}	6.10×10^{-7}	3.93	7.23	65.3	1000
1.46×10^{-8}	5.85×10^{-7}	2.33	4.28	62.9	1200
1.28×10^{-8}	5.63×10^{-7}	1.52	2.80	60.7	1300

نلاحظ من نتائج دراسة النفاذية للعينات الثلاثة المدروسة من التربة متوسطة الانتفاخ أن قيمة عامل النفاذية للتربة تنخفض بزيادة الضغط الشاقولي المطبق عليها كما أنه مع تناقص الرطوبة البدائية للعينة المدروسة ومع ازدياد ضغط انتفاخ العينة تتناقص قيم عامل النفاذية بمقدار صغير كما رأينا سابقاً في التربة الضعيفة الانتفاخ.



!!! œž!!! Œ! ! !!! !Œ!! !!Œ! !!œŒ!ƒ!!!! œž!!! Œ!! !! œš!!9!! 4



4 - 4 - 3 - التربة عالية الانتفاخ (محيط قرية زيزون):

- العينة الأولى: رطوبتها هي الرطوبة البدائية للتربة المدروسة، خواص العينة ونتائج دراسة النفاذية باستخدام طريقة جذر الزمن لتايلور مبينة في الجدولين (4 - 18)، (4 - 19)، وقيمة ضغط انتفاخ العينة تساوي **(σ_{sw} = 1050 KPa)** كما هو مبين في الشكل (4 - 10).

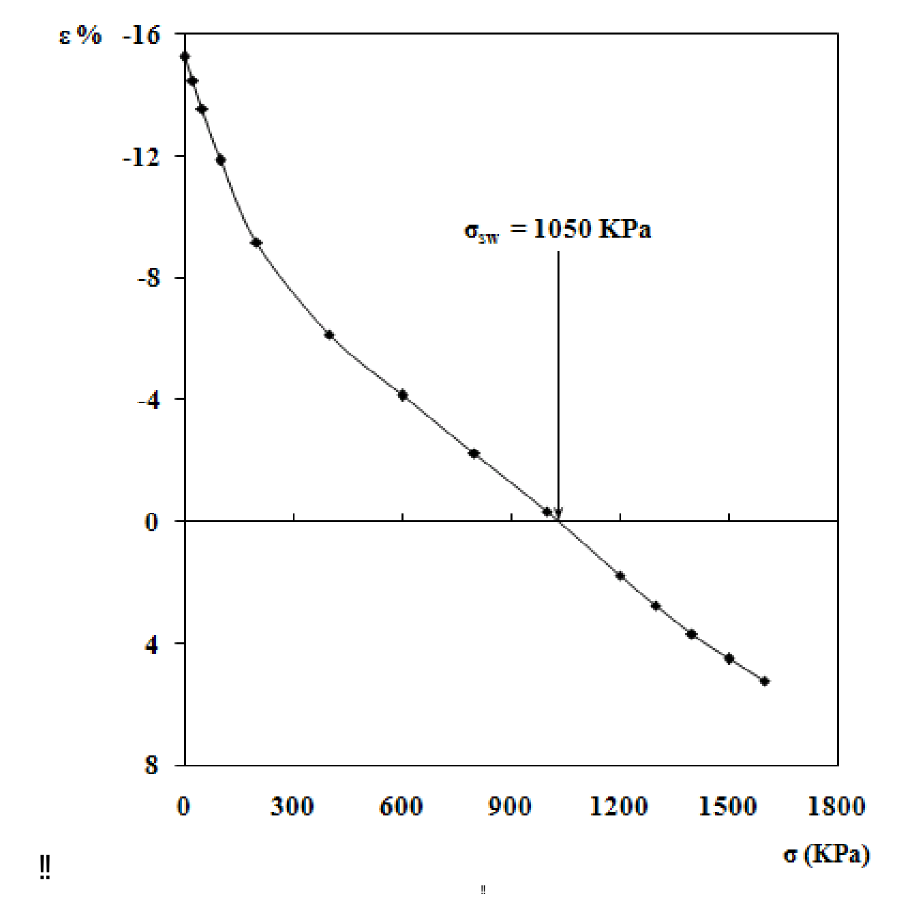
الجدول (4- 18): مواصفات العينة الأولى - التربة عالية الانتفاخ

18.3	γ_b (KN/m^3)!! ! ! !Œ! ! š!Œ! ! !Œ	27.9	(W %) ! !ƒ!Œ!! ! !
14.3	γ_d (KN/m^3)!! œ!Œ! ! š!Œ! ! !Œ	78.8	Sr (%) !! œ ! Œ! ! !
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œž!! Œ	102.5	e_o (%) !! ƒŒŒ œŒŽ!Œ!! !

!!! œž!!! Œƒ!œ!!!!!!Œ! !!! Œ!ƒ!Œƒ!œž!!! Œ!! !œ!!19!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	102.5	0
7.98×10^{-10}	6.74×10^{-10}	12.33	24.97	110.8	25
7.56×10^{-10}	6.53×10^{-10}	11.70	23.70	108.5	50
6.98×10^{-10}	6.31×10^{-10}	10.82	21.91	106.3	100
6.47×10^{-10}	6.17×10^{-10}	10.05	20.35	102.6	200
5.71×10^{-10}	5.94×10^{-10}	9.11	18.45	98.6	400
4.65×10^{-10}	5.77×10^{-10}	8.50	17.23	95.1	600
3.87×10^{-10}	5.41×10^{-10}	7.63	15.45	92.2	800
3.23×10^{-10}	5.26×10^{-10}	6.85	13.87	89.0	1000
2.65×10^{-10}	5.04×10^{-10}	5.72	11.58	85.9	1200
2.26×10^{-10}	4.82×10^{-10}	4.91	9.94	83.4	1300
1.85×10^{-10}	4.57×10^{-10}	3.73	7.55	81.3	1400
1.64×10^{-10}	4.30×10^{-10}	2.66	5.40	79.7	1500
1.38×10^{-10}	4.11×10^{-10}	1.28	2.62	77.4	1600

- العينة الثانية: رطوبتها أقل من رطوبة العينة الأولى وخواص العينة ونتائج دراسة النفاذية مبينة في الجدولين (4 - 20)، (4 -21)، وقيمة ضغط انتفاخ العينة تساوي **(σ_{sw} = 1200 KPa)** كما هو مبين في الشكل (4 - 11).



‼! œ̌!!! ŒƒœŒ!! !!Œ! !! ! Œ!ƒ!!!! œ̌!!! Œ!! !! œš!!10!! 4!!¾! !Œ

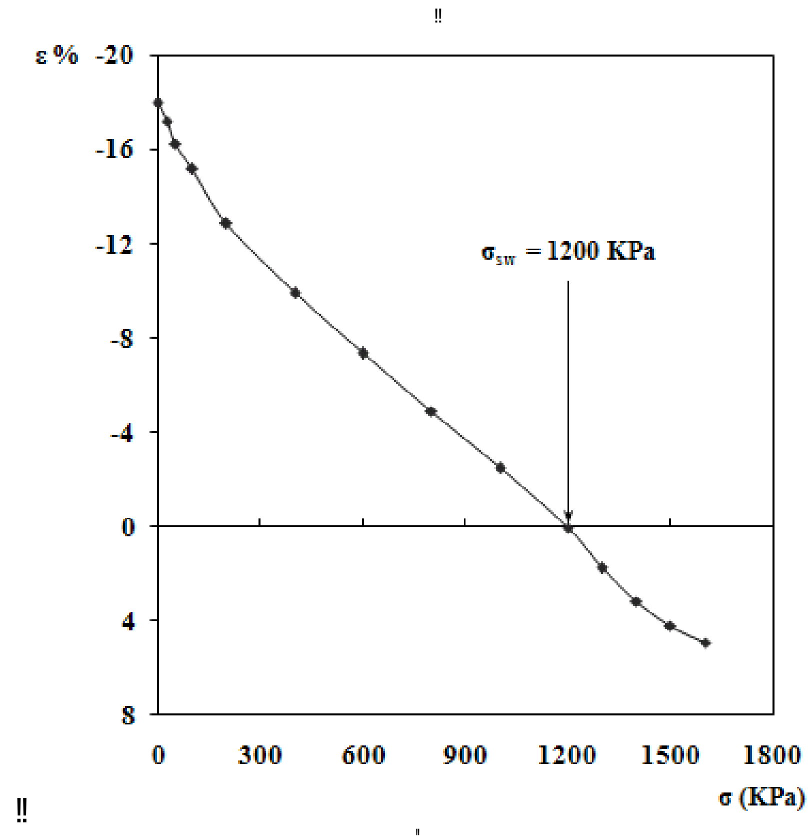
‼! œ̌!!! Œƒœ!! !! !!Œ! ƒœŒ!ƒ!Œ œ̌! Œ!!20!! 4!!¾!! !Œ

18.1	γ_b (KN/m^3)!! ! !!Œ!! š!Œ!! !Œ	24.2	(W %) !!ƒ!Œ!! ! !
14.6	γ_d (KN/m^3)!! œ!Œ!! š!Œ!! !Œ	71.4	Sr (%) !! œ ! Œ! ! !
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œ œ̌!! Œ	97.8	e_o (%) !! ƒŒŒ œŒŽ!Œ!! !

‼! œ̌!!! Œƒœ!! !! !!Œ! ƒœŒ!ƒ!Œƒœ̌!!! Œ!! !œ!!21!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	97.8	0
7.31×10^{-10}	6.05×10^{-10}	12.09	23.91	105.8	25
6.87×10^{-10}	5.84×10^{-10}	11.25	22.25	103.9	50
6.48×10^{-10}	5.62×10^{-10}	10.64	21.05	100.5	100
5.97×10^{-10}	5.45×10^{-10}	9.95	19.68	98.0	200
5.34×10^{-10}	5.27×10^{-10}	9.09	17.98	96.4	400
4.47×10^{-10}	5.06×10^{-10}	8.44	16.71	93.7	600
3.68×10^{-10}	4.78×10^{-10}	7.34	14.52	90.[illegible]	[illegible]

3.11×10^{-10}	4.53×10^{-10}	6.56	12.10	87.6	1000
2.39×10^{-10}	4.32×10^{-10}	5.31	10.51	84.1	1200
1.88×10^{-10}	4.16×10^{-10}	4.76	9.42	82.8	1300
1.61×10^{-10}	3.93×10^{-10}	3.52	6.12	80.5	1400
1.37×10^{-10}	3.77×10^{-10}	1.86	3.68	78.9	1500
9.88×10^{-11}	3.57×10^{-10}	0.93	1.84	76.3	1600



‼ž ‼ ‼ŒœœŒ ‼ ‼Œ ‼ ‼Œƒ‼‼ ‼Œ11‼ 4‼¾‼ Œ

‼ ǣ‼ Œƒœ‼Œ‼‼Œ ‼ƒœŒ ƒ‼‼ ǣ‼ Œ‼ ‼ œš

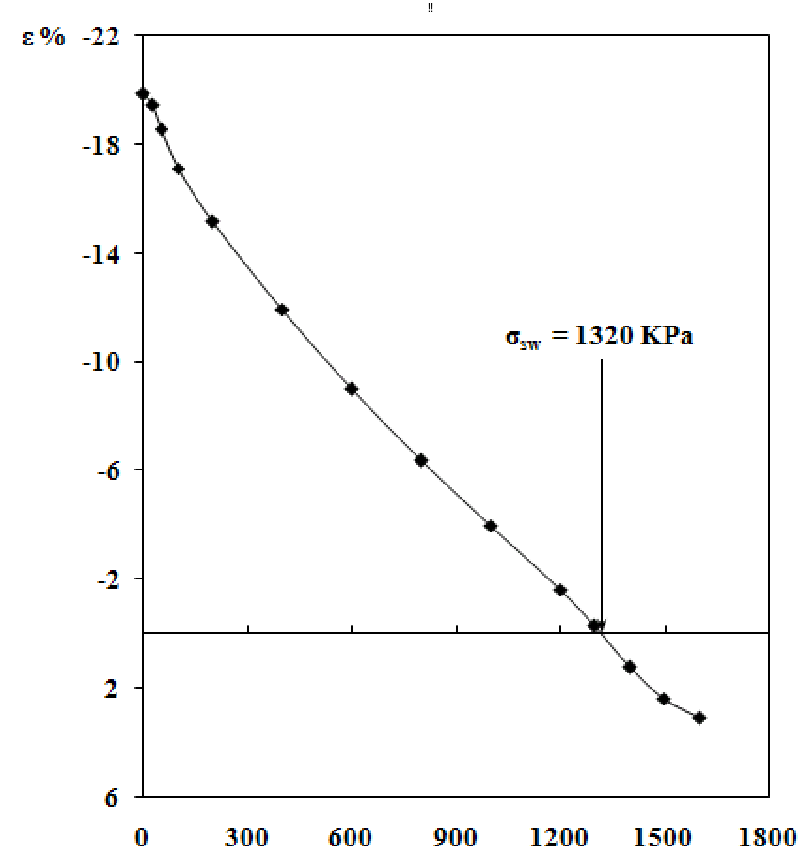
- العينة الثالثة: رطوبتها أقل من رطوبة العينة الثانية والنتائج مبينة في الجداول التالية، وضغط الانتفاخ للعينة المدروسة يساوي (σ_{sw} = 1320 KPa) كما هو مبين في الشكل (4 – 12).

‼ ǣ‼ Œƒœ‼‼ ‼Œ‼ œŒƒ Œ ǣ Œ‼22‼ 4‼¾‼ Œ

18.1	γ_b (KN/m^3)‼ ‼‼Œ‼ š‼Œ‼‼Œ	20.6	(W %) ‼ƒ‼Œ‼‼
15.0	γ_d (KN/m^3)‼ œŒ‼ š‼Œ‼‼Œ	64.4	Sr (%) ‼ œ‼ Œ‼ ‼
2.0	H_o (m) ‼ ‼ŒŒ‼ƒ‼Œǣ‼Œ	92.5	e_o (%) ‼ ƒŒŒ œŒŽ‼Œ‼ ‼

!!! ǎ!!! Œƒœ!!! !!Œ!!!œŒ!ƒ!Œƒǎ!!! Œ!! !œ!!23!! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m²/ sec)	m_v (m²/ KN)	a_v (m²/ KN)	e_i (%)	σ (KPa)
-	-	-	-	92.5	0
6.53×10^{-10}	5.46×10^{-10}	11.96	23.02	102.6	25
5.94×10^{-10}	5.28×10^{-10}	11.04	21.25	100.5	50
5.46×10^{-10}	5.02×10^{-10}	10.12	19.48	98.8	100
4.98×10^{-10}	4.87×10^{-10}	9.76	18.78	96.4	200
4.42×10^{-10}	4.61×10^{-10}	8.63	16.61	93.7	400
3.87×10^{-10}	4.46×10^{-10}	7.94	15.28	89.6	600
3.24×10^{-10}	4.23×10^{-10}	7.10	13.67	86.8	800
2.74×10^{-10}	3.94×10^{-10}	6.22	11.97	83.2	1000
2.19×10^{-10}	3.78×10^{-10}	5.11	9.84	80.5	1200
1.83×10^{-10}	3.52×10^{-10}	4.45	8.57	78.4	1300
1.54×10^{-10}	3.33×10^{-10}	3.13	6.03	76.8	1400
1.28×10^{-10}	3.16×10^{-10}	1.52	2.93	74.1	1500
9.82×10^{-11}	2.84×10^{-10}	0.71	1.37	72.8	1600



!!! ǎ!!! Œƒœ!!Œ!! !!Œ!!!œŒ!ƒ!!!! ǎ!!! Œ!! !! œš!!12! 4!



نلاحظ من نتائج التجارب التي أجريت على عينات من تربة عالية الانتفاخ أن قيمة عامل النفاذية تنخفض بزيادة الضغط الشاقولي المطبق عليها وتتناقص مع ازدياد ضغط انتفاخ العينة إلا أن مقدار التناقص يعتبر صغير بالمقارنة مع قيم النفاذية الصغيرة أصلاً وبالتالي فإن تأثير عوامل انتفاخ التربة المتمثلة بضغط الانتفاخ على قيمة عامل النفاذية محدود نسبياً.

4 -5- نتائج تجارب تطويق الانتفاخ ودراسة نفاذية التربة:

تم إجراء تجارب التطويق بالتزامن مع التجارب السابقة (تجارب دراسة الانتفاخ) كما ذكرنا سابقاً، ونبين فيما يلي النتائج التي حصلنا عليها:

4 - 5 - 1 - التربة ضعيفة الانتفاخ:

- العينة الأولى: تماثل العينة الأولى المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، وخواص العينة مبينة في الجدول (4 – 24):

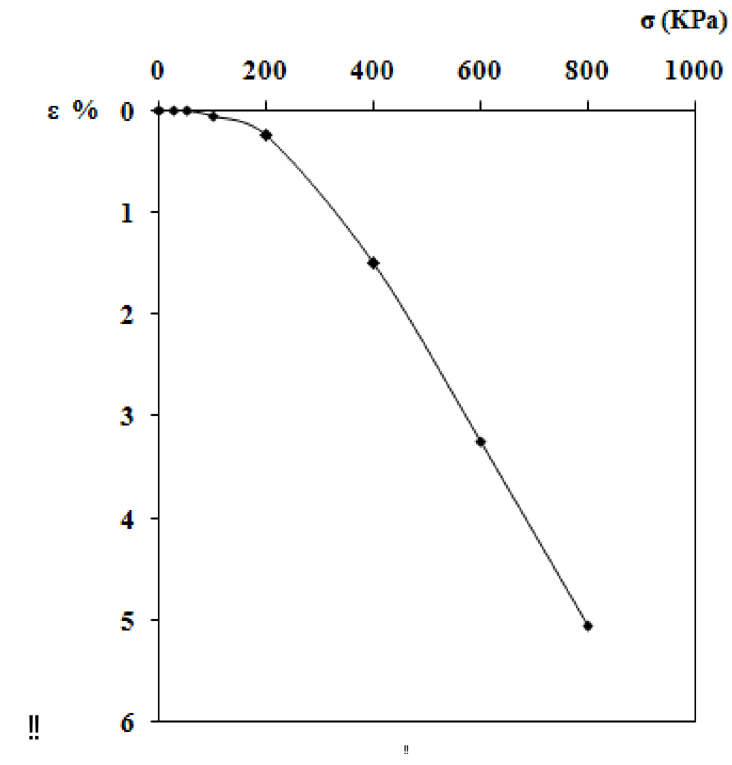
الجدول (4-24): خواص العينة الأولى - التربة ضعيفة الانتفاخ

17. 8	γ_b (KN/m³)!! ! ! !Œ!! š!Œ!! !Œ	23.6	(W %) !!ƒ!Œ!!! !
14.4	γ_d (KN/m³)!! œ!Œ!! š!Œ!! !Œ	73.3	Sr (%) !! œ! Œ! !!
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œœ!! Œ	86.4	e_o (%) !! ƒŒŒ œŒŽ!Œ!! !

!!! œ!!! ŒŽƒ!! !!!! !!Œ! !!! Œ!ƒ!Œƒœ!!!! Œ!! !œ!!25! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m²/ sec)	m_v (m²/ KN)	a_v (m²/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
!!œš!! !!! !!!!!!	-	-	-	25
!!œš!! !!! !!!!!!	-	-	-	50
!!œš!! !!! !!!!!!	-	-	-	100
1.35×10^{-7}	3.51×10^{-7}	3.85	7.17	200
1.05×10^{-7}	3.37×10^{-7}	2.24	4.18	400
6.82×10^{-8}	3.09×10^{-7}	1.64	3.06	600
4.05×10^{-8}	2.82×10^{-7}	0.84	1.57	800





!!!ž !! ! !Œdel ! Œ! !! !!Œ! ! !!Œ ƒ!!! !! !!Œ13! 4!!¾! !Œ

!!! œ̌!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ !! ! Œ!ƒ!!!! !! !de!Œ œ̌!!! Œ̌ ƒ! ! !

- العينة الثانية: تماثل العينة الثانية المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي:

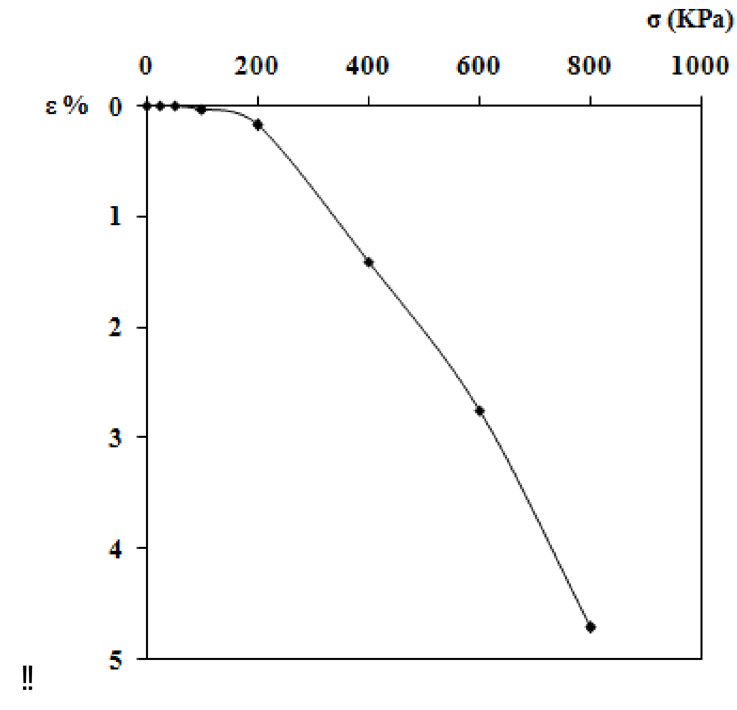
!!! œ̌!!! ŒŽƒ!! !!!! !!Œ! ƒdeŒ!ƒ!Œ Œ !!!26! 4!!¾! !Œ

17.5	γ_b (KN/m^3)!! ! ! !Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	20.4	(W %) ! !ƒ!Œ!! ! !
14.5	γ_d (KN/m^3)!! de!Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	64.6	Sr (%) !! de ! Œ! ! !
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œ œ̌!! Œ	84.7	e_o (%) !! ƒŒŒ deŒŽ!Œ!! !

!!! œ̌!!! ŒŽƒ!! !!!! !!Œ! ƒdeŒ!ƒ!Œƒœ̌!!! ! Œ!! !de!!27! 4!!¾! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
! !deš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	25
! !deš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	50
! !deš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	100
1.22×10^{-7}	3.31×10^{-7}	3.43	6.33	200
8.60×10^{-8}	3.14×10^{-7}	2.11	3.89	400
5.37×10^{-8}	2.78×10^{-7}	1.42	2.63	600
2.51×10^{-8}	2.53×10^{-7}	0.55	1.02	800





!!! œ!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ! ƒœŒ!ƒ!!!! !! !œ!Œ œ!!! Œ ƒ!!!!14! 4!!¾! !Œ

- العينة الثالثة: تماثل العينة الثالثة المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، نتائج التجربة مبينة في الجداول التالية:

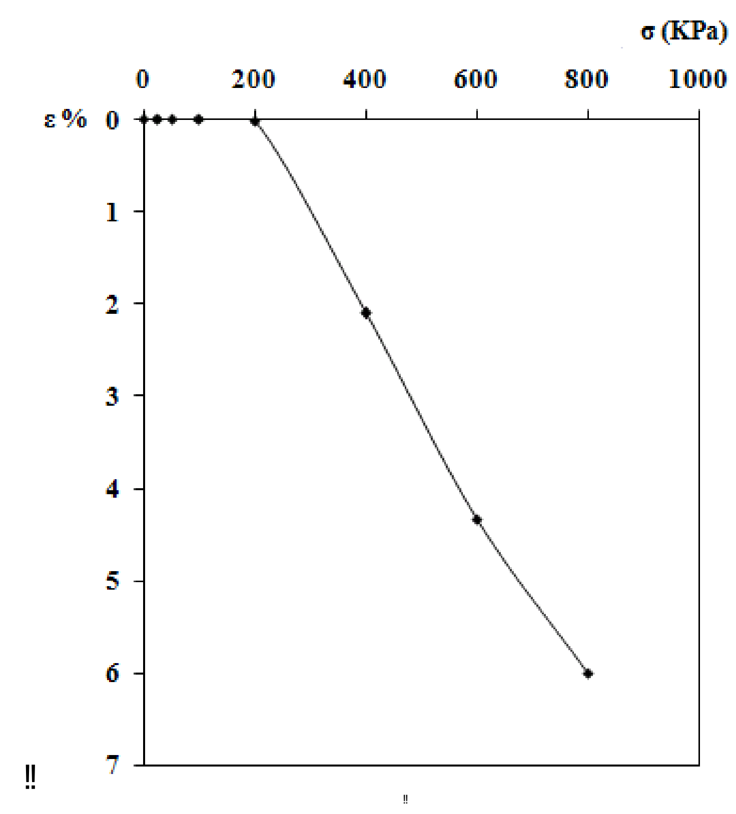
الجدول (4-28): خواص العينة الثالثة - التربة ضعيفة الانتفاخ

17.4	γ_b (KN/m^3)!! ! !!Œ!! š!Œ!! !Œ	17.85	(W %) !!ƒ!Œ!! ! !
14.8	γ_d (KN/m^3)!! œ!Œ!! š!Œ!! !Œ	81.5	e_o (%) !! ƒŒŒ œŒŽ!Œ!! !
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œ œ!! Œ	58.7	Sr (%) !! œ! Œ! !!

!!! œ!!! ŒŽƒ!!! !! !!Œ!! !!œŒ!ƒ!Œƒœ!!! Œ!! !œ!!29! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
!!œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	25
!!œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	50
!!œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	100
!!œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	200
6.85×10^{-8}	2.85×10^{-7}	2.64	4.81	400
3.46×10^{-8}	2.61×10^{-7}	1.36	2.47	600
1.02×10^{-8}	2.37×10^{-7}	0.42	0.76	800





!!!ž !! ! !ŒĚ ! Œ! !! !!Œ! ! !!Œ ƒ!!!! !!Œ15! 4!!¾! !Œ

!!!! œ!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ! !!ĚŒ! ƒ!!!! !! !Ě!Œ œ!!! Œž ƒ! ! !

نلاحظ أننا تمكنا من تطويق انتفاخ العينات المدروسة وأن مؤشر قياس التشوهات لم يعطِ أية قراءة عند تطبيق إجهادات أقل من ضغط الانتفاخ المطوق بالرغم من استخدام مؤشر بدقة قياس **(0.001)**، وهذا يعني أن العينة لم تتشوه بتأثير أي إجهاد أقل من ضغط الانتفاخ الذي تم تطويقه ولم تبدأ تشوهات الانضغاط إلا بعد أن تم تطبيق إجهاد شاقولي أكبر أو يساوي ضغط الانتفاخ.

ونلاحظ من نتائج دراسة نفاذية التربة مع تطويق الانتفاخ شاقولياً أننا لم نتمكن من حساب قيمة عامل النفاذية بطريقة التشديد عند تطبيق ضاغط أصغر من ضغط الانتفاخ الذي تم تطويقه.

4 - 5 - 2 - التربة متوسطة الانتفاخ:

- العينة الأولى: تماثل العينة الأولى المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، ونتائج تجربة التشديد مبينة فيما يلي:

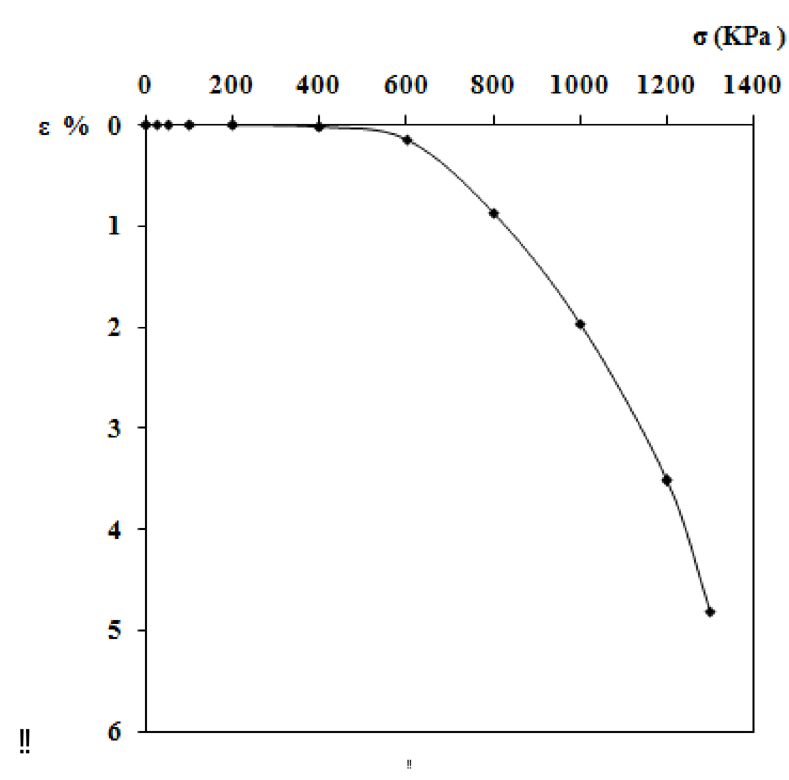
!!! œ!!! Œ! ! ! !! !! !! !!Œ! ! !! ! Œ!ƒ!Œ Œ !!!30! 4!!¾!! !Œ

19.0	γ_b (KN/m^3)	25.5	(W %)
15.1	γ_d (KN/m^3)	88.1	e_o (%)
2.0	H_o (m)	82.4	Sr (%)

!!! œ!!! Œ! ! ! !! !! !! !!Œ! ! !! ! Œ!ƒ!Œƒœ!!! ! Œ!! !Ě!!31! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	

!!Œèš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	25
!!Œèš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	50
!!Œèš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	100
!!Œèš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	200
!!Œèš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	400
5.42×10^{-8}	1.62×10^{-7}	5.34	10.04	600
5.27×10^{-8}	1.47×10^{-7}	4.83	9.01	800
4.76×10^{-8}	1.25×10^{-7}	4.11	7.73	1000
4.21×10^{-8}	1.03×10^{-7}	3.56	6.70	1200
3.97×10^{-8}	9.84×10^{-8}	2.72	5.12	1300



!!!ž !! ! !ŒÆdè ! ŒÆ! !! !!ŒÆ! ! !!ŒÆ ƒ!!! !! !!ŒÆ16! 4!!¾! !ŒÆ

!!! œž!!! ŒÆ! ! ! !! !ŒÆ!! !!ŒÆ! !! ! ŒÆ! ƒ!!!! !! !dè!ŒÆ œž!!! ŒÆž ƒ! ! !

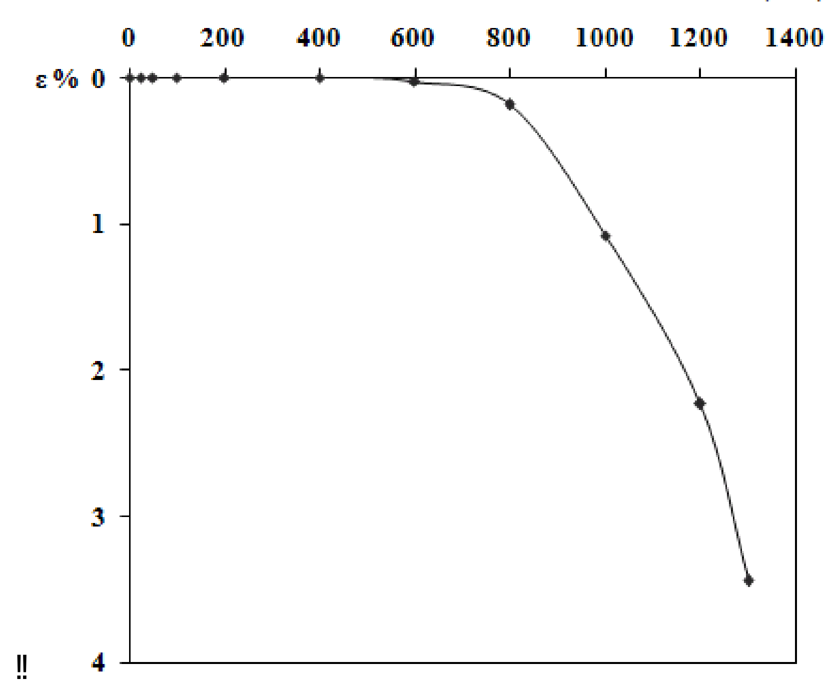
- العينة الثانية: تماثل العينة الثانية المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، ونتائج التجربة مبينة في الجداول التالية:

!!! œž!!! ŒÆ! ! ! !!!!!! !!ŒÆ! ƒ!dèŒÆ! ƒ!ŒÆ ŒÆ !!!32! 4!!¾!! !ŒÆ

18.7	γ_b (KN/m^3)!! ! !!ŒÆ ! ! š!ŒÆ! ! !ŒÆ	22.5	(W %) ! !ƒ!ŒÆ!! ! !
15.2	γ_d (KN/m^3)!! dè!ŒÆ ! ! š!ŒÆ! ! !ŒÆ	87.0	e_o (%) !! ƒ!ŒÆŒÆ dèŒÆž!ŒÆ!! !
2.0	H_o (m) !! !ŒÆŒÆ! ƒ!ŒÆ œž!! ŒÆ	73.8	

!!! ďž!!! Œ! ! !!!!!!!!Œ! ƒœŒ! ƒ!Œƒďž!!! Œ!! !œ!!33! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	25
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	50
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	100
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	200
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	400
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	600
3.18×10^{-8}	1.24×10^{-7}	4.36	8.15	800
2.44×10^{-8}	9.91×10^{-8}	3.75	7.01	1000
1.63×10^{-8}	9.77×10^{-8}	2.81	5.25	1200
1.32×10^{-8}	9.53×10^{-8}	1.63	3.05	1300



!!!! ďž!!! Œ! ! !!!Œ!! !!Œ! ƒœŒ! ƒ!!!! !! !œ!Œ ďž!!! Œž ƒ! !!!!17! 4!!¾! !Œ

- العينة الثالثة: تماثل العينة الثالثة المدروسة مع الانتفاخ، نتائج التجربة مبينة في الجداول التالية:

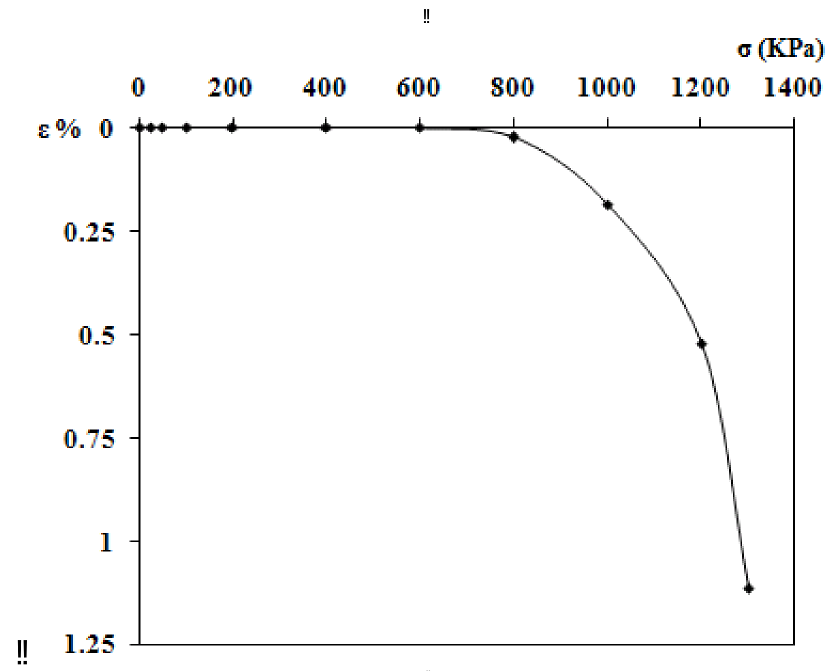
!!! ďž!!! Œ! ! !!!!!!!!Œ!!!œŒ! ƒ!Œ Œ!!!35! 4!!¾!! !Œ

18.4	γ_b (KN/m^3)!! ! ! !Œ! ! š!Œ! ! !Œ	19.0	(W %) ! !ƒ!Œ!! ! !
15.5	γ_d (KN/m^3)!! œ!Œ! ! š!Œ! ! !Œ	83.8	e_o (%) !! ƒ!ŒŒ œŒž!Œ!! !
2.0	H_o (m) !! !Œ!Œ! ƒ!Œ ďž!! Œ	64.5	[illegible]



!!! œ!!! Œ! ! !!!!!!! !!Œ!!!œŒ!ƒ!Œƒ!œ!!! Œ!! !œ!!36! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	25
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	50
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	100
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	200
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	400
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	600
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	800
1.77×10^{-8}	9.76×10^{-7}	3.21	5.81	1000
1.08×10^{-8}	9.46×10^{-7}	2.57	4.72	1200
7.91×10^{-8}	9.22×10^{-7}	1.23	2.26	1300



الشكل (4-18): تطويق الانتفاخ الشاقولي للعينة الثالثة ـ التربة المتوسطة الانتفاخ

4 - 5 - 3 - التربة عالية الانتفاخ:

- العينة الأولى: تماثل العينة الأولى المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، ونتائج تجربة التشديد مبينة فيما يلي:

الجدول (4-37): خواص العينة الأولى ـ التربة عالية الانتفاخ

18.3	γ_b (KNcm³)!! ! ! !Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	27.9	(W %) ! !ƒ!Œ!! ! !
14.3	γ_d (KN/m³)!! œ!Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	102.5	e_o (%) !! ƒ!ŒŒ œŒŽ!Œ!! !
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œœ!! Œ	78.7	Sr (%) !! œ! ! Œ! ! !



!!! œ!!! Œƒœ!!!!!Œ!!!! Œ!ƒ!Œƒœ!!!! Œ!! !œ!!38! 4!!¾!! !Œ

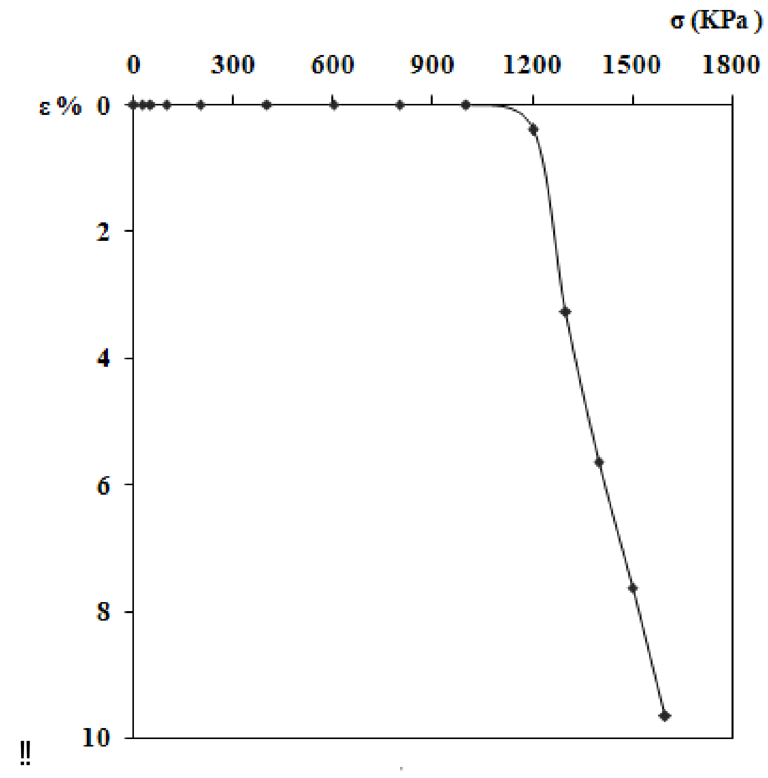
K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	25
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	50
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	100
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	200
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	400
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	600
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	800
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	1000
2.12×10^{-10}	2.92×10^{-9}	6.10	12.35	1200
1.66×10^{-10}	2.71×10^{-9}	5.74	11.62	1300
1.35×10^{-10}	2.44×10^{-9}	3.95	8.00	1400
9.98×10^{-10}	2.18×10^{-9}	3.23	6.54	1500
9.27×10^{-11}	1.92×10^{-9}	2.88	5.83	1600

- العينة الثانية: تماثل العينة الثانية المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، ونتائج التجربة مبينة في الجداول التالية:

!!! œ!!! Œƒœ!!!!!Œ!! ƒœŒ!ƒ!Œ Œ!!!39! 4!!¾!! !Œ

18.1	γ_b (KN/m^3)!! !!!Œ!! š!Œ!!!Œ	24.1	(W %) !!ƒ!Œ!!!!
14.6	γ_d (KN/m^3)!! œ!Œ!! š!Œ!!!Œ	97.8	e_o (%) !! ƒŒŒ œŒŽ!Œ!! !
2.0	H_o (m) !! !ŒŒ!ƒ!Œœ!! Œ	71.2	Sr (%) !! œ! Œ! !!



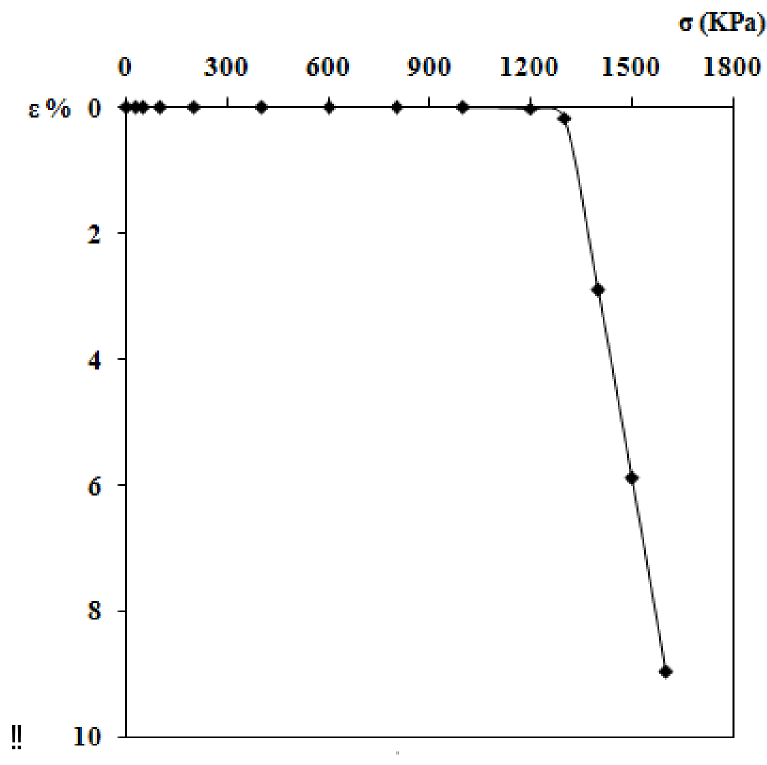


!!! œ̌!!! Œƒœ!œŒ!!!Œ !!! Œ!ƒ!!!! !!!œ!Œ œ̌!!! Œ̌ ƒ!!!!!19! 4!!¾! !Œ

! œ̌!!! Œƒœ!!!!!Œ!! ƒœŒ!ƒ!Œƒœ̌!!!! Œ!!! !œ!!40! 4!!¾!! !Œ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	25
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	50
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	100
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	200
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	400
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	600
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	800
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	1000
!!œš!! !!! !!!!!!!	-	-	-	1200
1.14×10^{-10}	1.73×10^{-10}	5.03	9.95	1300
9.45×10^{-11}	1.48×10^{-10}	4.86	9.61	1400
8.26×10^{-11}	1.13×10^{-10}	4.15	8.21	1500
7.47×10^{-11}	9.80×10^{-11}	3.76	7.44	1600





!!ž !! ! !!Œœ ! Œ! !! !!Œ! ! !!Œ ƒ!!! !! !!Œ20! 4!!¾! !Œ

!!! œž!!! Œƒ!œŒ!! !!Œ! ! ƒ!œŒ! ƒ!!!! !! !œ!Œ œž!!! Œž ƒ! ! !

• العينة الثالثة: تماثل العينة الثالثة المدروسة مع الانتفاخ من حيث رطوبتها البدائية ووزنها الحجمي، ونتائج التجربة مبينة في الجداول التالية:

الجدول (4-41): خواص العينة الثالثة ـ التربة عالية الانتفاخ

18.1	γ_b (KN/m^3)!! ! ! !Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	20.66	(W %) ! ! ƒ! !Œ!! ! !
15.0	γ_d (KN/m^3)!! œ!Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	92.4	e_o (%) !! ƒ!ŒŒ œŒŽ!Œ!! !
2.0	H_o (m) !! !Œ!Œ! ƒ! !Œ œž!! Œ	64.6	Sr (%) !! œ ! Œ! ! !

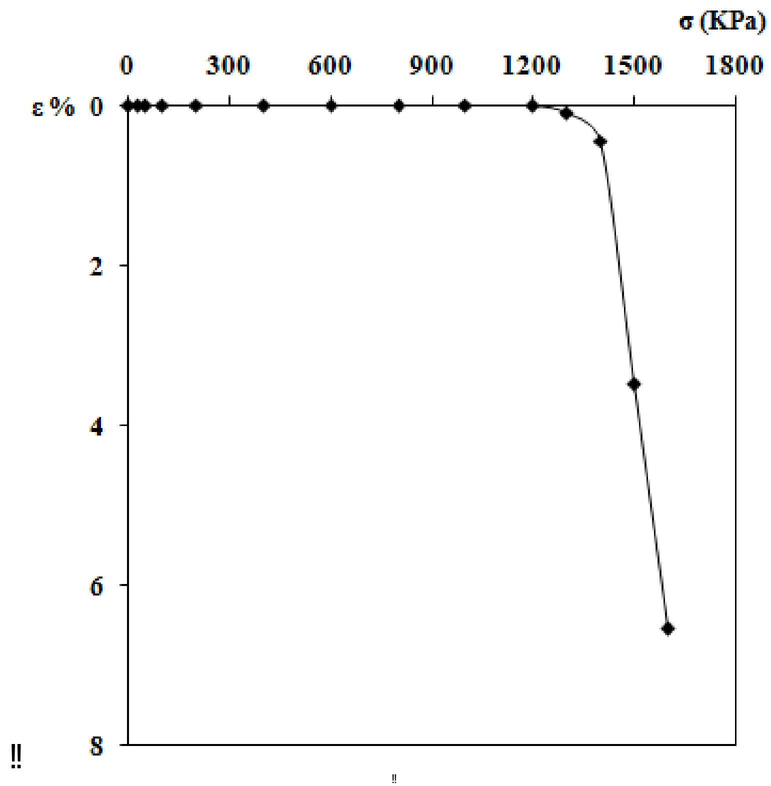
وبتمثيل العلاقة بين التشوه النسبي والإجهاد المطبق على العينة، الشكل (4 – 21)، نلاحظ أننا تمكنا من تطويق انتفاخ العينة كما أن تشوهات الانضغاط لم تظهر إلا بعد أن تم تطبيق إجهاد شاقولي أكبر أو يساوي ضغط الانتفاخ الذي تم تطويقه.

ومن خلال مقارنة قيم عوامل النفاذية للترب الثلاث المدروسة وفي الحالتين المدروستين (انتفاخ - تطويق انتفاخ) نجد أن قيم عوامل النفاذية في الحالة الأولى أكبر من قيمها في حالة تطويق الانتفاخ.

الجدول (4-42): نتائج دراسة نفاذية العينة الثالثة ـ التربة عالية الانتفاخ

K (m / sec)	C_v (m^2/ sec)	m_v (m^2/ KN)	a_v (m^2/ KN)	σ (KPa)
-	-	-	-	0
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	25
! !œš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	

!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	100
!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	200
!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	400
!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	600
!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	800
!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	1000
!!děš!! !!! !! !!!!!	-	-	-	1200
8.32×10^{-11}	1.73×10^{-10}	5.03	9.95	1300
7.24×10^{-11}	1.48×10^{-10}	4.86	9.61	1400
6.36×10^{-11}	1.13×10^{-10}	4.15	8.21	1500
5.36×10^{-11}	9.80×10^{-11}	3.76	7.44	1600



!!! œ̌!!! Œƒ!děŒ!! !!Œ! !!děŒ! ƒ!!!! !! !dě!Œ œ̌!!! Œ̌ ƒ! !!!!21! 4!!¾! !Œ

4 - 6 - التطبيقات العملية لتجارب تطويق الانتفاخ - دراسة حقلية - تحليل واقع بعض السدود الترابية المنفذة في سوريا:

4 - 6 - 1 - الهدف من الدراسة:

دراسة واقع بعض السدود الترابية المنفذة في القطر العربي السوري من حيث طريقة تصميمها ومادة إنشائها ولا سيما تصميم وإنشاء العنصر المضاد للرشح أي النواة الغضارية، وبيان إمكانية تطبيق تجارب



تطويق الانتفاخ من أجل تحديد عامل النفاذية لتربة النواة الغضارية وذلك على اعتبار أن عامل النفاذية هو المعيار الرئيسي في دراسة التسرب عبر النواة وفي جسم السد.

وقد بنيت الدراسة على نتائج تجارب تطويق الانتفاخ التي تم إجراؤها على ترب غضارية مختلفة في قابليتها للانتفاخ وتصلح كمادة لبناء السد الترابي وإنشاء النواة الغضارية، حيث أظهرت هذه النتائج أن قيمة عامل نفاذية التربة القابلة للانتفاخ في حال تم تطويق انتفاخها يكون أقل من قيمته في حال لم يتم تطويق الانتفاخ، وفي حال أمكن اعتماد قيمة عامل النفاذية الناتجة عن تجربة تطويق الانتفاخ على اعتبار أن تطويق الانتفاخ محقق عملياً في النواة الغضارية للسد في حال تجاوز ارتفاعها قيمة محددة (كما سنرى لاحقاً)، فإنه يمكن تخفيض عوامل الأمان أثناء التصميم من خلال تخفيض أبعاد النواة الغضارية مع المحافظة على توازنها واستقرارها وهذا ينعكس بدوره على الكلفة الاقتصادية لتصميم وإنشاء السد الترابي.

4 - 6 - 2 ـ لمحة عامة عن السدود المنفذة في سوريا:

تتنوع السدود الموجودة في القطر العربي السوري من حيث وظيفتها وطريقة إنشائها، حيث تم إنشاء **160** سداً لغاية عام **2006** تتوزع كما يلي:

الجدول (4-43): عدد السدود المنفذة في الجمهورية العربية السورية لغاية عام 2006 [23]

!! !!!!!!!!! ! ƒ!! !!! !œ ! Œ ƒ! ! !!Œ	!2006!! ƒœ!!Ž!!Œ!! !! !Œ!!	! !œŒ ! š!Œ
8.282	6	! ! ! ! Œ! !!!
206.2	41	! ! ! ! ƒ(
947.72	42	! ! œŒ
69.59	37	! ƒ!œ(
552.92	19	¾š œ!(
16136	3	! !š! !! ŒŽ!
1045.34	12	! ! !œ!Œ! !! !
18966.052	160	! ! ! ! !!(

وتصنف هذه السدود تبعاً لارتفاعها كما يلي:

الجدول (4-44): تصنيف السدود المنفذة في الجمهورية العربية السورية من حيث ارتفاعها [23]

Œ!! ƒ!œ	! ƒ!œ	! œž!! Œ! ! !!!	! œž!! Œ! Ž! !	! !œŒ ! š!(
-	1	1	4	! ! ! ! Œ! !!!
-	3	25	13	! ! ! ! ƒŒ
-	-	6	36	! ! œ(
-	-	-	37	! ƒ!œŒ
-	1	10	8	¾š œ!(
-	-	2	1	! !š! !! ŒŽ!
-	-	2	10	! ! !œ!Œ! !! !
0	5	46	109	! ! ! ! !!(

ونشير هنا إلى أن غالبية السدود المنفذة في سوريا هي سدود ترابية أو ركامية وتضم نواة غضارية أو نو اة مع مصار ف مائية و فلاتر عكسية تتوضع على جانبي النواة [23].

كنيكية التصميمية للترب المدروسة في البحث كمادة بناء للنواة الغضارية:



نبين في الجداول التالية خواص الترب الثلاثة المدروسة في بحثنا وإمكانية استخدام كل منها كمادة بناء للنواة الغضارية:

الجدول (4-45): خواص الترب المدروسة تبعاً للتجارب المخبرية وعلاقات ميكانيك التربة

!ƒ deŒ	!deš!! de!!!!!	! ƒ de!!!!	!!! ƒ!!!!!
!! W_n (%)!! ƒ ƒ!! !Œ!! ! ! !Œ	**23.8**	**25.5**	**27.9**
W_L (%)!! !! ƒ !Œš	**58.0**	**63.5**	**78.0**
W_P (%)!! !! !!!Œš	**29.1**	**31.0**	**33.0**
!! e (%)!! ƒ ƒ!! !Œ deŒŽ!Œ!! !	**86.4**	**88.1**	**102.5**
!! n (%)!! ƒ de! !Œ	**46.4**	**46.8**	**50.6**
!! γ_b (KN/m^3)!! ! ! !Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	**17.8**	**19.0**	**18.3**
!!γ_d (KN/m^3)!! deŒ ! ! š!Œ ! ! !Œ	**14.4**	**15.1**	**14.3**
!!γ_{sat} (KN/m^3)!! !! ! !Œ ! ! š!Œ ! ! !Œ	**19.0**	**19.8**	**19.3**

!!! ƒ de ! !ŒŒŒ!!!! de!! de! de! Œ !! Œ¼de! !!!! ! !!!! !Œ ! !!!!! ƒdeš!Œ Œ !Œ 46! 4!!¾!! !Œ

!ƒ deŒ	!deš!! de!!!!!	! ƒ de!!!!	!!! ƒ!!!!!
!! W_{opt} (%)!! ƒde!Œ!! ! ! !Œ	**25.1**	**27.0**	**29.0**
W_d (%)!! ƒ ƒ!! !!Œ!! ! ! !Œ	**24.1**	**26.0**	**28.0**

نلاحظ من الجدول (4 – 45) أن الرطوبة الطبيعية للترب المدروسة قريبة من الرطوبة التصميمية والترب المدروسة حد سيولتها أكبر من (**50 %**)، وبالتالي يمكن استخدام هذه الترب في إنشاء نواة غضارية لسد ترابي حيث يتم ردمها ورصها عند الرطوبة الطبيعية.

4 - 6 - 4 - المثال المدروس:

سنقوم بدراسة التسرب في سد الشهيد باسل الأسد الذي تم إنجازه عام **2000** في محافظة طرطوس وهو سد تخزيني ويعتبر من السدود المستهلكة للماء باعتبار أن المياه التي يتم توجيهها من بحيرة التخزين إلى المساحات الزراعية ستقوم بتأمين الاحتياجات المائية للمحاصيل الزراعية المروية، حيث يقوم هذا السد بإرواء مساحة **10160** هكتاراً، وتبلغ مساحة بحيرة التخزين **6900** ألف متر مربع وارتفاع جسم السد (**H_D = 50 m**) وطوله **733 m**، وهو سد ترابي يضم نواة غضارية مركزية مع ثلاثة فلاتر عكسية تحيط بالنواة من كل جانب إضافة إلى مصرف ماء خارجي، ويبين الشكل (4 – 22) مقطعاً عرضياً في جسم السد المدروس [25].

وقد تم اختيار هذا المثال تحديداً بعد دراسة وبحث وتحليل لعدة سدود ترابية في مناطق متفرقة من سوريا (نذكر منها سد تشرين على نهر الفرات وهو سد ترابي مع ستارة مانعة للرشح، سد على نهر الكبير الشمالي وهو سد ترابي مع نواة مائلة)، وذلك بسبب التوافق بين تربة نواة السد وتربة تارين المتوسطة الانتفاخ التي تمت دراستها في البحث كما سنرى لاحقاً، وبسبب توفر معلومات عن قيم التسرب المقاسة عبر جسم السد سنوياً والتي تمكنا من الحصول عليها من سجلات مديرية الموارد المائية في طرطوس [24]، مما يمكننا من مقارنة نتائج التجارب المخبرية مع القيم الحقلية للنفاذية والتسرب عبر جسم السد.

ونبين فيما يلي قيم التسرب الحقلية التي حصلنا عليها من المهندسين في موقع السد وذلك تبعاً لحجم التخزين السنوي وهي محسوبة من أجل شريحة طولية من بحيرة التخزين، علماً أن التسرب المسموح ألا يزيد عن **% (3 ~ 2)** من حجم بحيرة التخزين [24]:

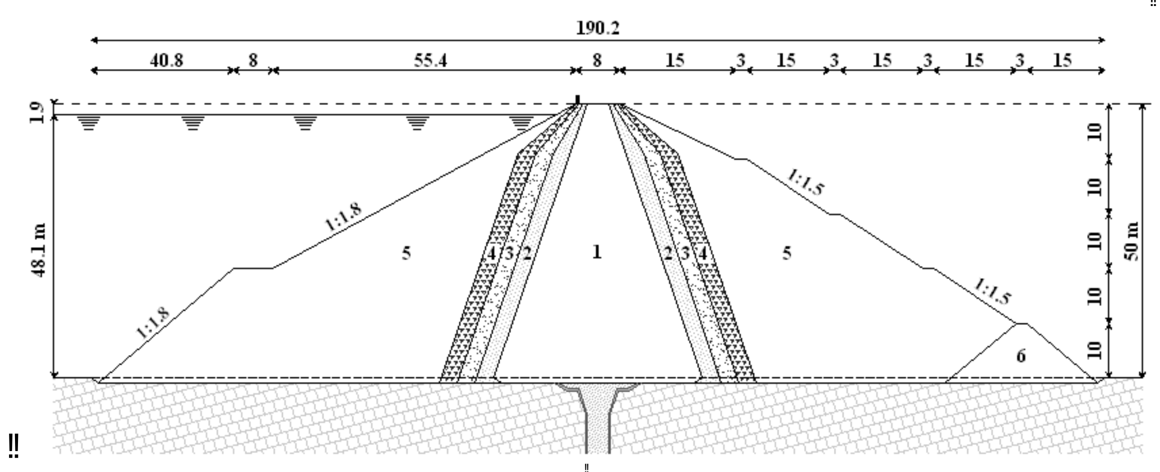
الجدول (4-47): قيم التسرب الحقلية التقديرية عبر سد الشهيد باسل الأسد [24]

!œ‰Œ	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
!!(m³/day)!! !! !!!!! ƒ! ƒ!!!!Œ! ƒ!Œ	0.180	0.208	0.221	0.243	0.247	0.248	0.250
(%)!! ƒ! ! !!Œ!! !	65	70	72	88	95	95	98

تربة جسم السد عبارة عن ركام صخري عامل نفاذيتها: **K_T = 1.5 m/day = 1.74 × 10^{-5} m/sec**، وعرض قمة السد **B = 8 m**، ارتفاع الماء في بحيرة التخزين أمام السد **(H_1 = 48.1 m)**، سماكة النواة الغضارية من الأعلى **(δ_1 = 4 m)**، سماكة النواة من الأسفل **(δ_2 = 38 m)**، والسماكة الوسطية للنواة **(δ_c = 21 m)**، ميل المنحدر الأمامي للسد **m_1 = 1:1.8**، وميل المنحدر الخلفي **m_2 = 1:1.5** [25].

تربة النواة الغضارية هي تربة غضارية حمراء اللون وهي غضار عالي اللدونة حد سيولتها **63.8 %** وحد لدونتها **30 %**، تركيبها الحبي كما يلي: نسبة الغضار **35.80 %**، نسبة السيلت **44.10 %**، نسبة الرمل **15.40 %**، نسبة البحص **4.70 %** [25].

بناءً على المعطيات السابقة سنقوم بدراسة التسرب عبر جسم السد **(q_T)** اعتماداً على طريقة الافتراض المذكورة سابقاً حيث سيتم استبدال النواة الغضارية المركزية بتربة ذات عامل نفاذية يساوي عامل النفاذية لتربة جسم السد، وبافتراض عدة حلول على أن يتم استخدام الترب الثلاثة المدروسة في البحث كمادة بناء للنواة الغضارية للسد المدروس بحيث يتم حساب عامل نفاذية النواة بتأثير إجهاد الوزن الذاتي لتربة النواة عند منتصف النواة وفي حالتين: أولاً: انتفاخ تربة النواة شاقولياً بتأثير تيار الماء المتسرب عبرها، ثانياً: تطويق انتفاخ تربة النواة شاقولياً بتأثير إجهاد الوزن الذاتي في منتصف النواة.



!! ! ! œ‰Œ !! !Œ!! ! !!!! 6!•! !! ! !Œ‰œ !Œ 5!•! !œ‰Œ!!Ž!Œ4!•! !œ‰Œ!!Ž!Œ3!•¾! Œ!!Ž!Œ2!•! ƒ! œ‰ !!ŒŒ!Œ 1

!!≥25@ ! ! ! ! !! !œ! ! !•!! ! Œ¾ œ‰! ƒ! ! !Œ! !!! ! !! !!! ! !! !!! ! !!!!22! 4!!¾! !Œ

الحل الأول: اعتماد أبعاد النواة الغضارية المنفذة في الواقع مع وجود الفلاتر العكسية وموشور الصرف الخارجي:

أولاً: تربة النواة هي تربة مشروع مطار حماة المنخفضة الانتفاخ:

1. الحالة الأولى: حساب عامل نفاذية تربة النواة **K_C** في حال انتفاخ التربة شاقولياً أي بالاعتماد على المنحني الممثل للعلاقة بين الإجهاد المطبق وعامل النفاذية، الشكل (5 – 1) كما سنرى لاحقاً، وبتأثير إجهاد الوزن الذاتي عند منتصف النواة:

$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot h = 19.0 \times 25 = 475 \text{ KPa}$$



ومنه نجد أن: $K_C = 1.09 \times 10^{-7}$ m/sec

2. الحالة الثانية: حساب عامل نفاذية تربة النواة K_C في حال تطويق انتفاخ التربة شاقولياً على اعتبار أن إجهاد الوزن الذاتي في منتصف النواة أكبر من ضغط انتفاخ التربة **($\sigma > \sigma_{SW} = 75$ KPa)** واعتماداً على الشكل (5 – 8) الممثل للعلاقة بين الإجهاد المطبق على التربة وعامل نفاذيتها في حال تطويق انتفاخها نجد أن: $K_C = 8.61 \times 10^{-8}$ m/sec.

ونبين في الجدول (4 - 48) قيم التسرب في الحالتين السابقتين اعتماداً على العلاقات والمعطيات السابقة حيث q_T هي قيمة التسرب عبر جسم السد مع الأخذ بعين الاعتبار وجود الفلاتر الثلاثة.

الجدول (4-48): قيم التسرب في حال استخدام تربة منخفضة الانتفاخ

q_T (m³/day)	h_1 (m)	L_P (m)	L (m)	B_1 (m)	δ_O (m)	الحالة المدروسة
1.22	0.61	3384.64	3365.4	3331	3344	انتفاخ
0.47	0.21	4275	4255.8	4221.4	4234.4	تطويق انتفاخ

نلاحظ من الجدول السابق أن مقدار التسرب عبر جسم السد قد انخفض بمقدار **(% 60)** تقريباً عند الاعتماد على قيمة عامل النفاذية للتربة المدروسة في حالة تطويق انتفاخها بتأثير إجهاد الوزن الذاتي.

ثانياً: تربة النواة هي تربة تارين المتوسطة الانتفاخ:

1. الحالة الأولى: حساب عامل نفاذية تربة النواة K_C في حال انتفاخ التربة شاقولياً أي بالاعتماد على المنحني الممثل للعلاقة بين الإجهاد المطبق وعامل النفاذية، الشكل (5 – 2)، وبتأثير إجهاد الوزن الذاتي عند منتصف النواة:

$$\sigma = \gamma_{sat} . h = 19.8 \times 25 = 495 \text{ KPa}$$

ومنه نجد أن: $K_C = 6.72 \times 10^{-8}$ m/sec

2. الحالة الثانية: حساب عامل نفاذية تربة النواة K_C في حال تطويق انتفاخ التربة شاقولياً على اعتبار أن إجهاد الوزن الذاتي في منتصف النواة أكبر من ضغط انتفاخ التربة **($\sigma > \sigma_{SW} = 360$ KPa)** واعتماداً على الشكل (5 – 9) الممثل للعلاقة بين الإجهاد المطبق على التربة وعامل نفاذيتها في حال تطويق انتفاخها نجد أن: $K_C = 5.65 \times 10^{-8}$ m/sec.

ونبين في الجدول (4 – 49) قيم التسرب في الحالتين السابقتين اعتماداً على العلاقات والمعطيات السابقة:

الجدول (4-49): قيم التسرب في حال استخدام تربة متوسطة الانتفاخ

q_T (m³/day)	h_1 (m)	L_P (m)	L (m)	B_1 (m)	δ_O (m)	الحالة المدروسة
0.76	0.48	5465.7	5446.5	5412	5425	انتفاخ
0.25	0.12	6492.6	6473.4	6439	6452	تطويق انتفاخ

نلاحظ من الجدول السابق أن مقدار التسرب عبر جسم السد قد انخفض بمقدار **(% 65)** تقريباً عند الاعتماد على قيمة عامل النفاذية للتربة المدروسة في حالة تطويق انتفاخها بتأثير إجهاد الوزن الذاتي. كما أن القيم الحسابية للتسرب بالاعتماد على المنحنيات التجريبية لتجارب تطويق الانتفاخ الشاقولي لتربة تارين تتوافق إلى حد كبير مع القيم الحقلية التقديرية للتسرب الواردة في الجدول **(4-47)** مما !!Ÿ ! !! مؤشراً على صحة نتائج النفاذية التي يمكن الحصول عليها من المنحنيات التجريبية لتجارب تطويق الانتفاخ الشاقولي.

ثالثاً: تربة النواة هي تربة زيزون العالية الانتفاخ:

1. الحالة الأولى: حساب عامل نفاذية تربة النواة K_C في حال انتفاخ التربة شاقولياً أي بالاعتماد على المنحني الممثل للعلاقة بين الإجهاد المطبق وعامل النفاذية، الشكل (5 – 3)، وبتأثير إجهاد الوزن الذاتي عند منتصف النواة:



$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot h = 19.3 \times 25 = 483 \text{ KPa}$$

ومنه نجد أن: $K_C = 4.92 \times 10^{-10}$ m/sec

2. الحالة الثانية: لا يمكن حساب عامل نفاذية تربة النواة K_C في حال تطويق انتفاخ التربة شاقولياً على اعتبار أنه لم يحدث تطويق للانتفاخ في هذه الحالة لأن إجهاد الوزن الذاتي في منتصف النواة أصغر من ضغط انتفاخ التربة ($\sigma < \sigma_{SW} = 1050$ KPa) أي لم يتم التغلب على ضغط الانتفاخ عند الارتفاع المدروس.

ونبين في الجدول (4 - 50) قيمة التسرب في الحالة المدروسة اعتماداً على العلاقات والمعطيات السابقة:

الجدول (4-50): قيم التسرب في حال استخدام تربة عالية الانتفاخ

q_T (m³/day)	h_1 (m)	L_P (m)	L (m)	B_1 (m)	δ_O (m)	K_C (m/sec)	الحالة المدروسة
0.015	0.01	1482107	741044	741010	741023	4.92×10^{-10}	انتفاخ

نلاحظ من الجدول السابق أن التسرب عبر جسم السد قد أصبح صغيراً جداً بسبب استخدام تربة عالية الانتفاخ عامل نفاذيتها قليل.

الحل الثاني: تخفيض أبعاد النواة الغضارية مع وجود الفلاتر وموشور الصرف:

سنقوم بدراسة التسرب عبر جسم السد مرة أخرى بحيث نقوم بتخفيض سماكة النواة من الأسفل بمقدار (20 %) تقريباً أي تصبح ($\delta_2 = 30$ m)، والسماكة الوسطية للنواة ($\delta_c = 14.5$ m)، مع الأخذ بعين الاعتبار المحافظة على استقرار وتوازن النواة الغضارية.

أولاً: تربة مشروع مطار حماة المنخفضة الانتفاخ:

الجدول (4-51): قيم التسرب في حال استخدام تربة منخفضة الانتفاخ

q_T (m³/day)	h_1 (m)	L_P (m)	L (m)	B_1 (m)	δ_O (m)	الحالة المدروسة
1.43	0.48	2752.3	2733.1	2698.7	2707.7	انتفاخ
0.55	0.23	3472.4	3453.1	3418.8	3427.8	تطويق انتفاخ

نلاحظ أن التسرب ازداد (15 %) تقريباً في حال تخفيض سماكة النواة من الأسفل بمقدار (20 %).

ثانياً: تربة النواة هي تربة تارين المتوسطة الانتفاخ:

الجدول (4-52): قيم التسرب في حال استخدام تربة متوسطة الانتفاخ

q_T (m³/day)	h_1 (m)	L_P (m)	L (m)	B_1 (m)	δ_O (m)	الحالة المدروسة
0.92	0.34	4436.5	4417.2	4382.9	4391.9	انتفاخ
0.30	0.14	5268.2	5249	5214.7	5223.7	تطويق انتفاخ

نلاحظ من الجدول السابق أن التسرب ازداد بمقدار (18 %) تقريباً في حال تخفيض سماكة النواة من الأسفل بمقدار (20 %).

ثالثاً: تربة النواة هي تربة زيزون العالية الانتفاخ:

الجدول (4-53): قيم التسرب في حال استخدام تربة عالية الانتفاخ

q_T (m³/day)	h_1 (m)	L_P (m)	L (m)	B_1 (m)	δ_O (m)	الحالة المدروسة
0.019	0.03	599919	599900	599866	599875	! ﺩ!!

نلاحظ من الجدول السابق أن التسرب عبر جسم السد قد ازداد بمقدار (11 %) تقريباً في حال تخفيض [illegible]دار (20 %)، إلا أن قيمة التسرب لا تزال صغيرة وتكاد تكون معدومة.

للمقارنة بين الحلول والأساليب السابقة نرتب النتائج في الجدول التالي:

الجدول (4-54): قيم التسرب الناتجة في حال استخدام الترب الثلاثة

!!!!! !! ! !ŒŒ!! !Œ !! !ŒŒ!!!! œœ!! ! œœ	(m³/day)!!! !ŒŒ! ! !!!! !! !! !!ŒŒ! ƒ!			
	!!!!! ƒ œ !!ŒŒ!!!! ƒ ƒš!Œœ! Œ ! !! !(!!!! !!!!!! ž(		!!!! žŒ!!(20 %)!! Œ! ! δ_2 ! ƒŽ! ! ! !! !(!!!! !!!	
	! œž!!Œ	ž ƒ!!!	! œž!!Œ	ž ƒ!!!
! œš!! œ! !!!!!	1.22	0.47	1.43	0.55
!!! ƒ œ! !!!	0.76	0.25	0.92	0.30
!!! ! ! ƒ !!!!!	0.015	-	0.019	-

نلاحظ من خلال مقارنة النتائج السابقة ما يلي:

- يمكن استخدام التربة الضعيفة الانتفاخ في حال توفرها في موقع إنشاء السد أو في مكان قريب منه مع اعتماد الحل الأول (الأبعاد الواقعية للنواة) مع الأخذ بعين الاعتبار قيمة عامل النفاذية الناتجة عن تطويق انتفاخ التربة عند منتصف النواة الغضارية.

- قيم التسرب الناتجة في حال استخدام تربة متوسطة الانتفاخ أقل من القيم الناتجة في حال استخدام تربة ضعيفة الانتفاخ، وبالتالي تعتبر الخيار الأفضل في حال توفرها في موقع السد بحيث يمكن تخفيض كلفة إنشاء النواة بمقدار (**20 %**) تقريباً من خلال تخفيض سماكة النواة من الأسفل خاصةً وأن إنشاء الفلاتر العكسية على جوانب النواة وموشور الصرف الخارجي للتيار المتسرب تعتبر عامل أمان كافي لتحقيق توازن السد وحماية النواة من التآكل.

- إن قيم التسرب المحسوبة عند استخدام تربة متوسطة الانتفاخ مشابهة لتربة نواة السد المدروس وبالاعتماد على المنحنيات التجريبية الناتجة عن تجارب تطويق الانتفاخ الشاقولي للتربة تتوافق إلى حد كبير مع قيم التسرب الحقلية الواردة في الجدول **(4-47)**.

- تعطي التربة العالية الانتفاخ أقل قيمة للتسرب عبر جسم السد في حال إمكانية استخدامها كمادة بناء للنواة الغضارية لأن نفاذيتها قليلة جداً مقارنة مع باقي أنواع الترب، إلا أن قابلية هذه التربة العالية للتغيرات الحجمية تعتبر عامل ضعف ضمن النواة الغضارية خاصةً في حال السدود العالية الارتفاع وفي حال تعاقب مواسم الجفاف والرطوبة بشكل متكرر مما يزيد خطر تآكل وانجراف النواة الأمر الذي يؤثر على توازن واستقرار السد الترابي [42].



الفصل الخامس ...

!!

التحليل الرياضي

(النتائج والتوصيات)



5-1- المجموعة الأولى من التجارب (دراسة الانتفاخ والنفاذية):

5 - 1 - 1 - تأثير الرطوبة الطبيعية للتربة المدروسة على عامل النفاذية:

وجدنا من خلال التجارب التي أجريت على الترب الثلاثة المدروسة وعند رطوبات مختلفة أن عامل النفاذية ينخفض بانخفاض الرطوبة البدائية للعينة وبتأثير ضاغط ثابت أي عند تطبيق نفس الإجهاد الشاقولي على العينة، حيث أنه مع انخفاض الرطوبة البدائية للعينة تزداد قابلية التربة للانتفاخ وبالتالي تنخفض قيمة عامل النفاذية، إلا أن **معدل تناقص عامل النفاذية يعتبر صغيراً جداً بالمقارنة مع قيم عامل النفاذية للترب الغضارية التي تتراوح عادةً بين $(10^{-9} \sim 10^{-13}$ m/sec) وبالتالي نجد أن تأثير الرطوبة البدائية للتربة الانتفاخية على عامل نفاذيتها محدود.**

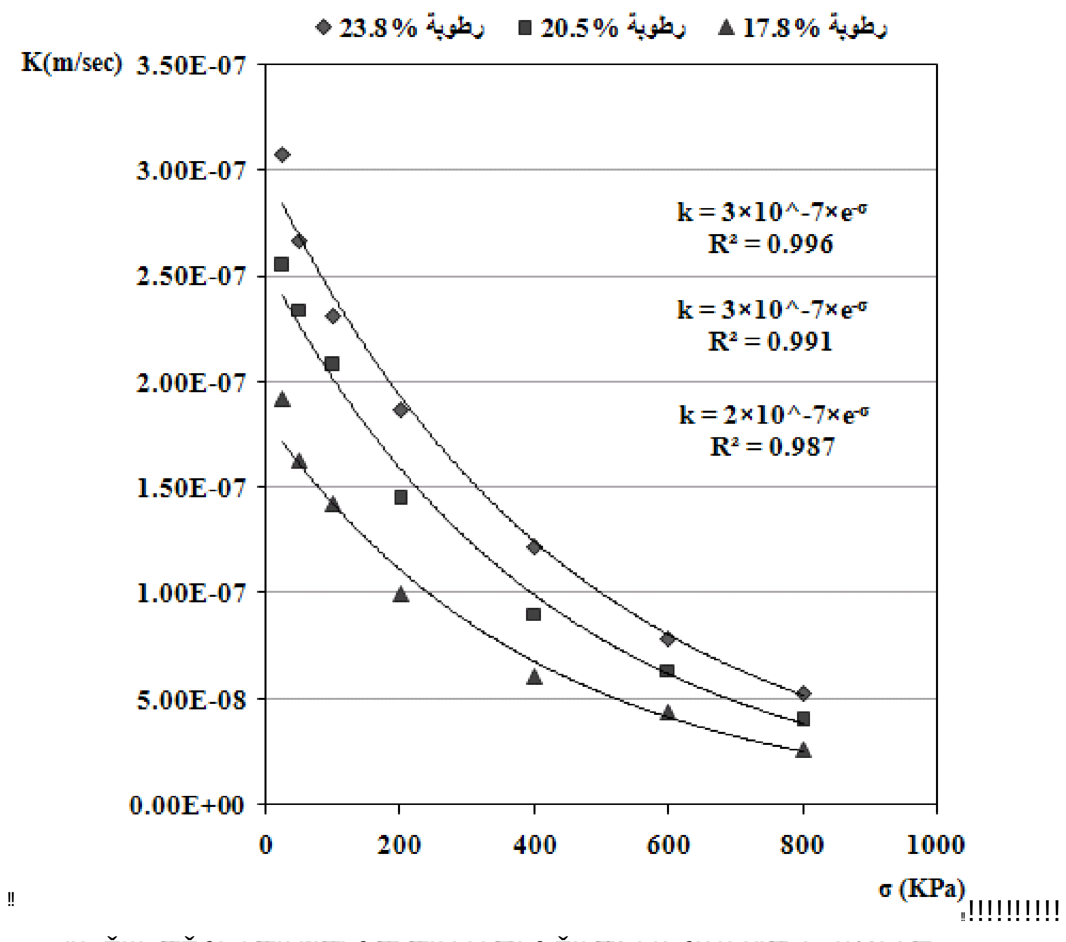
نلاحظ من الأشكال (5-1)، (5-2)، (5-3) الممثلة للنتائج المبينة في الجداول (5-1)، (5-2)، (5-3) على التوالي، أن المنحنيات الثلاثة لكل تربة تكاد تكون متطابقة مع بعضها ولها نفس الميل أي أن قيم عوامل النفاذية تتغير بشكل محدود تبعاً لتغير الرطوبة البدائية للعينة المدروسة.

الجدول (5-1): قيم عوامل النفاذية للتربة الضعيفة الانتفاخ عند رطوبات مختلفة

K (m / sec)			(KPa)!!!!! !!Œ Œde ! Œƒ	
!!!deŒ!ƒ!!Œ W = 17.8 %	!ƒ!deŒ!ƒ!!Œ W = 20.5 %	! !! ! Œ!ƒ!!Œ W = 23.8 %	$\Delta\sigma$!de ! Œz !!	σ_o ! !ŒŒde ! Œ
1.92×10^{-7}	2.55×10^{-7}	3.07×10^{-7}	25	0.0
1.63×10^{-7}	2.34×10^{-7}	2.67×10^{-7}	25	25
1.42×10^{-7}	2.08×10^{-7}	2.31×10^{-7}	50	50
9.95×10^{-8}	1.45×10^{-7}	1.87×10^{-7}	100	100
7.86×10^{-8}	9.02×10^{-8}	1.22×10^{-7}	200	200
4.39×10^{-8}	6.34×10^{-8}	7.87×10^{-8}	200	400
2.58×10^{-8}	4.02×10^{-8}	5.28×10^{-8}	200	600

!!! Ž!!! !!! de! !!!!! !! œž!!! Œ! ! ! !!!Œ!! !!!!! ƒœž!!Œ¾Œ !!!ƒ!2! 5!!¾!! !Œ

K (m / sec)			(KPa)!!!!! !!Œ Œde ! Œƒ	
!!!deŒ!ƒ!!Œ W = 19.1 %	!ƒ!deŒ!ƒ!!Œ W = 22.3 %	! !! ! Œ!ƒ!!Œ W = 25.5 %	$\Delta\sigma$!de ! Œz !!	σ_o ! !ŒŒde ! Œ
7.34×10^{-8}	8.19×10^{-8}	8.92×10^{-8}	25	0.0
6.72×10^{-8}	7.43×10^{-8}	8.47×10^{-8}	25	25
6.05×10^{-8}	6.82×10^{-8}	7.91×10^{-8}	50	50
5.28×10^{-8}	6.24×10^{-8}	7.53×10^{-8}	100	100
4.33×10^{-8}	5.31×10^{-8}	6.88×10^{-8}	200	200
3.17×10^{-8}	4.45×10^{-8}	6.36×10^{-8}	200	400
2.39×10^{-8}	3.62×10^{-8}	5.83×10^{-8}	200	600
1.94×10^{-8}	3.01×10^{-8}	5.37×10^{-8}	200	800
1.46×10^{-8}	2.46×10^{-8}	4.91×10^{-8}	200	1000
1.28×10^{-8}	1.97×10^{-8}	4.68×10^{-8}	100	



!!! ǆ!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ! ƒ!ŒŒŒ!! ! ! !Œ! ƒ!ǆ!!Œ¼œ!! ƒ!!!!! !!Œ1! 5!!¾! !Œ

!!! Ž!!! !!! œ! ! !!!! !! ǆ!!! Œƒ!œŒ!! !!!!! ƒ!ǆ!!Œ¼Œ !!ƒ!3! 5!!¾!! !Œ

K (m / sec)			(KPa)!!!!! !!Œ Œœ ! Œƒ	
!!!œŒ!ƒ!Œ W = 20.6 %	! ƒ!œŒ!ƒ!Œ W = 24.2 %	! !!! Œ!ƒ!Œ W = 27.9 %	$\Delta\sigma$!œ ! Œ !!	σ_o ! !ŒŒœ ! Œ
6.53×10^{-10}	7.31×10^{-10}	7.98×10^{-10}	25	0.0
5.94×10^{-10}	6.87×10^{-10}	7.56×10^{-10}	25	25
5.46×10^{-10}	6.48×10^{-10}	6.98×10^{-10}	50	50
4.98×10^{-10}	5.97×10^{-10}	6.47×10^{-10}	100	100
4.42×10^{-10}	5.34×10^{-10}	5.71×10^{-10}	200	200
3.87×10^{-10}	4.47×10^{-10}	4.65×10^{-10}	200	400
3.24×10^{-10}	3.68×10^{-10}	3.87×10^{-10}	200	600
2.74×10^{-10}	3.11×10^{-10}	3.23×10^{-10}	200	800
2.19×10^{-10}	2.39×10^{-10}	2.65×10^{-10}	200	1000
1.83×10^{-10}	1.88×10^{-10}	2.26×10^{-10}	100	

1.54×10^{-10}	1.61×10^{-10}	1.85×10^{-10}	100	1300
1.28×10^{-10}	1.37×10^{-10}	1.64×10^{-10}	100	1400
9.82×10^{-11}	9.88×10^{-11}	1.38×10^{-10}	100	1500

◆ 25.5 % رطوبة ■ 22.3 % رطوبة ▲ 19.1 % رطوبة

K(m/sec)

1.00E-07
8.00E-08
6.00E-08
4.00E-08
2.00E-08
0.00E+00

$k = 9 \times 10^{-8} \times e^{-0.05\sigma}$
$R^2 = 0.986$

$k = 8 \times 10^{-8} \times e^{-\sigma}$
$R^2 = 0.991$

$k = 7 \times 10^{-8} \times e^{-\sigma}$
$R^2 = 0.997$

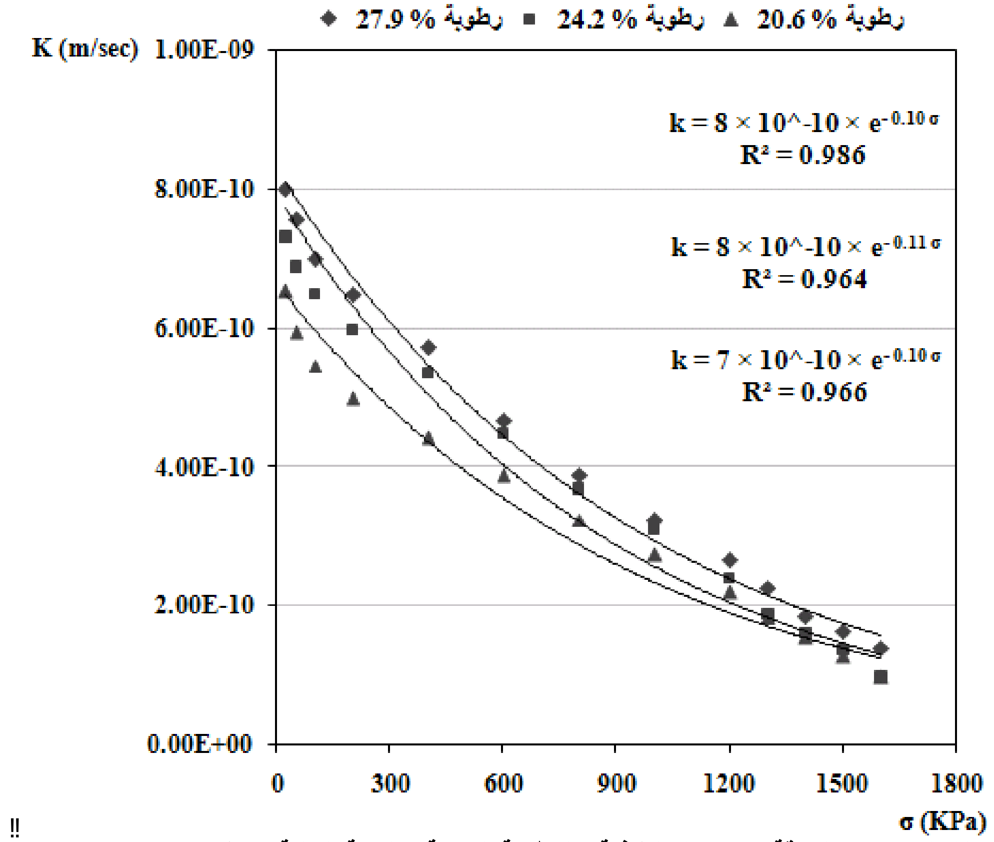
0 200 400 600 800 1000 1200 1400

σ (KPa)

!!!!!!!!!!!!

!! ǒ!!! Œ! ! !!!Œ!! !!Œ! ƒŒŒ!! ! !Œ! ƒǒ!!Œ¼œ!! ƒ!!!! !!Œ2! 5!!¾! !Œ





!!

الشكل (5-3): العلاقة بين عامل النفاذية والرطوبة البدائية - التربة العالية الانتفاخ

5 - 1 - 2 - تأثير ضغط انتفاخ التربة المدروسة على عامل نفاذيتها:

إن زيادة ضغط الانتفاخ بانخفاض الرطوبة البدائية للعينة المدروسة ومن أجل كل تربة من الترب الثلاثة تؤدي إلى انخفاض قيمة عامل النفاذية للعينة وبتأثير ضاغط ثابت أي عند تطبيق نفس الإجهاد الشاقولي على العينة، والسبب في ذلك يعود إلى زيادة سماكة طبقات الماء المدمصة المحيطة بجزيئات التربة وبالتالي تناقص حجم الفراغات التي يمكن للماء الجريان عبرها مما يسبب انخفاض نفاذية التربة، **وكما ذكرنا سابقاً فإن معدل تناقص عامل النفاذية بزيادة ضغط انتفاخ التربة صغير جداً أي أن تأثير ضغط انتفاخ التربة على عامل نفاذيتها محدود،** الأشكال (5-4)، (5-5)، (5-6) تمثل نتائج الجداول (5-4)، (5-5)، (5-6) على التوالي.

الجدول (5-4): قيم عوامل النفاذية للتربة الضعيفة الانتفاخ عند ضغوط انتفاخ مختلفة

K (m / sec)			(KPa)!!!!! !![illegible]	
[illegible] σ_{sw} = 135 KPa	[illegible] σ_{sw} = 91 KPa	[illegible] σ_{sw} = 75 KPa	$\Delta\sigma$ [illegible]	σ_o [illegible]
1.92×10^{-7}	2.55×10^{-7}	3.07×10^{-7}	25	0.0
1.63×10^{-7}	2.34×10^{-7}	2.67×10^{-7}	25	25
1.42×10^{-7}	2.08×10^{-7}	2.31×10^{-7}	50	50
9.95×10^{-8}	1.45×10^{-7}	1.87×10^{-7}	100	100
7.86×10^{-8}	9.02×10^{-8}	1.22×10^{-7}	200	200
4.39×10^{-8}	6.34×10^{-8}	7.87×10^{-8}	200	400
2.58×10^{-8}	4.02×10^{-8}	5.28×10^{-8}	200	

◆ $\sigma o = 0$ KPa , $\Delta\sigma = 25$ Kpa
$k = -2\times10^{-9}\times\sigma_{sw} + 4\times10^{-7}$, $R^2 = 0.957$

■ $\sigma o = 25$ KPa , $\Delta\sigma = 25$ KPa
$k = -2\times10^{-9}\times\sigma_{sw} + 4\times10^{-7}$, $R^2 = 0.996$

▲ $\sigma o = 50$ KPa , $\Delta\sigma = 50$ KPa
$k = -1\times10^{-9}\times\sigma_{sw} + 3\times10^{-7}$, $R^2 = 0.999$

● $\sigma o = 100$ KPa , $\Delta\sigma = 100$ KPa
$k = -1\times10^{-9}\times\sigma_{sw} + 3\times10^{-7}$, $R^2 = 0.943$

✳ $\sigma o = 200$ KPa , $\Delta\sigma = 200$ KPa
$k = -1\times10^{-9}\times\sigma_{sw} + 2\times10^{-7}$, $R^2 = 0.923$

□ $\sigma o = 400$ KPa , $\Delta\sigma = 200$ KPa
$k = -6\times10^{-10}\times\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2 = 0.963$

+ $\sigma o = 600$ KPa , $\Delta\sigma = 200$ KPa
$k = -4\times10^{-10}\times\sigma_{sw} + 8\times10^{-8}$, $R^2 = 0.950$

K(m/sec)

3.50E-07
3.00E-07
2.50E-07
2.00E-07
1.50E-07
1.00E-07
5.00E-08
0.00E+00

70 80 90 100 110 120 130 140

σ_{sw} (Kpa)

!! œ!!! Œ! Ž! !! !Œ!! ‼Œ! Ž!! ! !Œ œ!!! Œ! !! ! !! ƒ œ!! Œ¼œ!! ƒ!!!! !!Œ! 5!!¾! !Œ!!!!!!!!



‼! Ž!‼ !‼ œ̌!!Œ!!! !‼! !! œ̌!!! Œ! ! !‼!‼ ‼‼! ƒ!œ̌!!Œ¼Œ !‼ƒ5! 5!!¾!! !Œ

K (m / sec)			(KPa)!! !‼ !!Œ Œœ! ! Œƒ!	
!!!œŒ!ƒ!!Œ σ_{sw} = 645 KPa	! ƒ!œŒ!ƒ!!Œ σ_{sw} = 470 KPa	! !! ! Œ!ƒ!!Œ σ_{sw} = 360 KPa	$\Delta\sigma$!œ ! Œž !!	σ_o ! !ŒŒœ ! Œ
7.34×10^{-8}	8.19×10^{-8}	8.92×10^{-8}	25	0.0
6.72×10^{-8}	7.43×10^{-8}	8.47×10^{-8}	25	25
6.05×10^{-8}	6.82×10^{-8}	7.91×10^{-8}	50	50
5.28×10^{-8}	6.24×10^{-8}	7.53×10^{-8}	100	100
4.33×10^{-8}	5.31×10^{-8}	6.88×10^{-8}	200	200
3.17×10^{-8}	4.45×10^{-8}	6.36×10^{-8}	200	400
2.39×10^{-8}	3.62×10^{-8}	5.83×10^{-8}	200	600
1.94×10^{-8}	3.01×10^{-8}	5.37×10^{-8}	200	800
1.46×10^{-8}	2.46×10^{-8}	4.91×10^{-8}	200	1000
1.28×10^{-8}	1.97×10^{-8}	4.68×10^{-8}	100	1200

‼! Ž!‼ !‼ œ̌!!Œ!!! !‼! !! œ̌!!! Œƒ!œ!!! !‼‼! ƒ!œ̌!!Œ¼Œ !‼ƒ6! 5!!¾!! !Œ

K (m / sec)			(KPa)!! !‼ !!Œ Œœ! ! Œƒ!	
!!!œŒ!ƒ!!Œ σ_{sw} = 1320 KPa	! ƒ!œŒ!ƒ!!Œ σ_{sw} = 1200 KPa	! !! ! Œ!ƒ!!Œ σ_{sw} = 1050 KPa	$\Delta\sigma$!œ ! Œž !!	σ_o ! !ŒŒœ ! Œ
6.53×10^{-10}	7.31×10^{-10}	7.98×10^{-10}	25	0.0
5.94×10^{-10}	6.87×10^{-10}	7.56×10^{-10}	25	25
5.46×10^{-10}	6.48×10^{-10}	6.98×10^{-10}	50	50
4.98×10^{-10}	5.97×10^{-10}	6.47×10^{-10}	100	100
4.42×10^{-10}	5.34×10^{-10}	5.71×10^{-10}	200	200
3.87×10^{-10}	4.47×10^{-10}	4.65×10^{-10}	200	400
3.24×10^{-10}	3.68×10^{-10}	3.87×10^{-10}	200	600
2.74×10^{-10}	3.11×10^{-10}	3.23×10^{-10}	200	800
2.19×10^{-10}	2.39×10^{-10}	2.65×10^{-10}	200	1000
1.83×10^{-10}	1.88×10^{-10}	2.26×10^{-10}	100	1200
1.54×10^{-10}	1.61×10^{-10}	1.85×10^{-10}	100	1300
1.28×10^{-10}	1.37×10^{-10}	1.64×10^{-10}	100	1400
9.82×10^{-11}	9.88×10^{-11}	1.38×10^{-10}	100	1500



!!

!!

!!

◆ σo = 0 Kpa , $\Delta\sigma$ = 25 KPa
$k = -5\times10^{-11}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.992$

■ σo = 25 Kpa , $\Delta\sigma$ = 25 KPa
$k = -6\times10^{-11}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.943$

▲ σo = 50 Kpa , $\Delta\sigma$ = 50 KPa
$k = -6\times10^{-11}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.948$

● σo = 100 Kpa , $\Delta\sigma$ = 100 KPa
$k = -8\times10^{-11}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.954$

✳ σo = 200 Kpa , $\Delta\sigma$ = 200 KPa
$k = -9\times10^{-11}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.932$

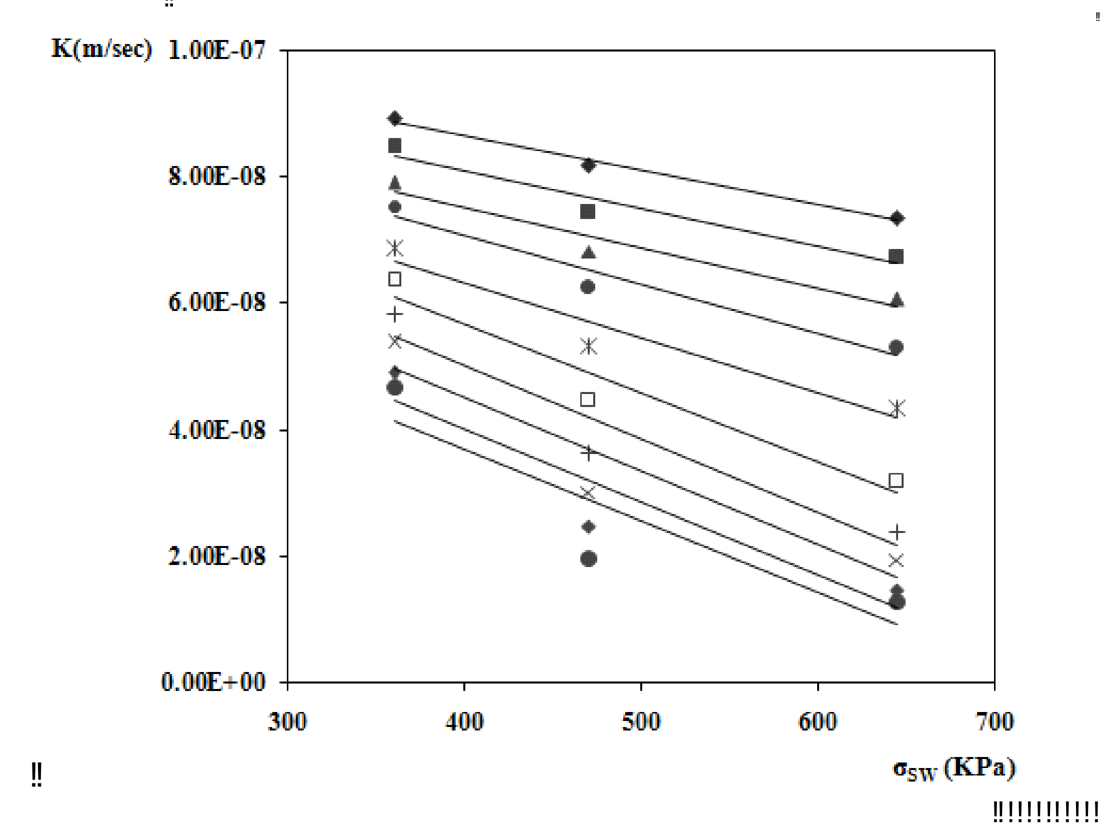
□ σo = 400 Kpa , $\Delta\sigma$ = 200 KPa
$k = -1\times10^{-10}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.941$

+ σo = 600 Kpa , $\Delta\sigma$ = 200 KPa
$k = -1\times10^{-10}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-7}$, $R^2=0.916$

× σo = 800 Kpa , $\Delta\sigma$ = 200 KPa
$k = -1\times10^{-10}.\sigma_{sw} + 9\times10^{-8}$, $R^2=0.885$

◆ σo = 1000 Kpa , $\Delta\sigma$ = 200 KPa
!! $k = -1\times10^{-10}.\sigma_{sw} + 9\times10^{-8}$, $R^2=0.869$

● σo = 1200 Kpa , $\Delta\sigma$ = 200 KPa
$k = -1\times10^{-10}.\sigma_{sw} + 8\times10^{-8}$, $R^2=0.801$



!!

!!!!!!!!!!!

!!! ǽ!!! Œ! ! ! !! !Œ!! !!Œ! Ž!!! ! !Œ ǽ!!! Œ! !! ! !! ƒ! ǽ! !Œ¼œ! ! ƒ! !! !! !!Œ! 5!! ¾! !Œ

!!

!!

!!

!!

!!



!!

!!

◆ σ_o = 0 KPa , $\Delta\sigma$ = 25 Kpa
$k = -5\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-9}$, R^2=0.988

■ σ_o = 25 KPa , $\Delta\sigma$ = 25 Kpa
$k = -6\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-9}$, R^2=0.977

▲ σ_o = 50 KPa , $\Delta\sigma$ = 50 Kpa
$k = -6\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-9}$, R^2=0.934

● σ_o = 100 KPa , $\Delta\sigma$ = 100 Kpa
$k = -5\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-9}$, R^2=0.938

⁎ σ_o = 200 KPa , $\Delta\sigma$ = 200 Kpa
$k = -5\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 1\times10^{-9}$, R^2=0.909

□ σ_o = 400 KPa , $\Delta\sigma$ = 200 Kpa
$k = -3\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 8\times10^{-10}$, R^2=0.872

+ σ_o = 600 KPa , $\Delta\sigma$ = 200 Kpa
$k = -2\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 6\times10^{-10}$, R^2=0.918

× σ_o = 800 KPa , $\Delta\sigma$ = 200 Kpa
$k = -2\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 5\times10^{-10}$, R^2=0.882

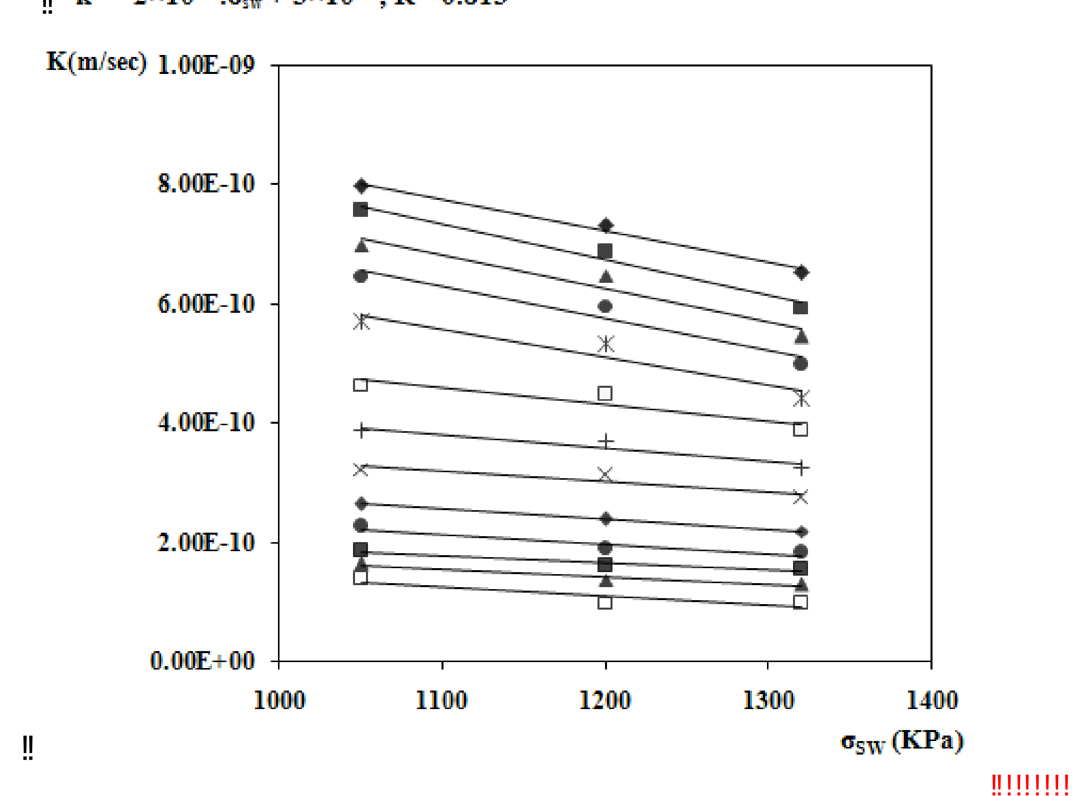
◆ σ_o = 1000 KPa , $\Delta\sigma$ = 200 Kpa
$k = -2\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 4\times10^{-10}$, R^2=0.999

● σ_o = 1200 KPa , $\Delta\sigma$ = 100 Kpa
$k = -2\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 4\times10^{-10}$, R^2=0.880

■ σ_o = 1300 KPa , $\Delta\sigma$ = 100 Kpa
$k = -1\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 3\times10^{-10}$, R^2=0.942

▲ σ_o = 1400 KPa , $\Delta\sigma$ = 100 Kpa
$k = -1\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 3\times10^{-10}$, R^2=0.953

□ σ_o = 1500 KPa , $\Delta\sigma$ = 100 Kpa
!! $k = -2\times10^{-13}.\sigma_{sw} + 3\times10^{-10}$, R^2=0.813



!!

!!!!!!!!

!!! œ!!! ŒƒœŒ!!!!Œ!Ž!!!!!Œœ!!! Œ!!! !!!ƒœ!Œ¼œ!ƒ!!!!!Œ5!!¾!!Œ

!!
!!
!!
!!
!!
!!



5 - 1 - 3 - تأثير الإجهاد الشاقولي المطبق على الترب المدروسة على عامل نفاذيتها:

نلاحظ من الأشكال (5-1)، (5-2)، (5-3)، أن قيم عامل النفاذية للترب الثلاث المدروسة تتناقص مع زيادة الضغط المطبق على العينة وذلك بسبب انخفاض مسامية التربة الناتج عن انضغاطها بتأثير الضغوط المتزايدة المطبقة على التربة.

5- 2- المجموعة الثانية من التجارب (تطويق انتفاخ التربة شاقولياً):

5 - 2 - 1 - تأثير تطويق انتفاخ التربة المدروسة شاقولياً على عامل النفاذية:

تبين لنا من خلال التجارب المخبرية أن قيم عوامل النفاذية للترب المدروسة في حال السماح لها بالانتفاخ أكبر من قيم النفاذية في حال تطويق الانتفاخ شاقولياً، كما تبين لنا أنه لا يمكن إيجاد قيمة عامل النفاذية بطريقة التشديد في حالة تطويق انتفاخ التربة شاقولياً وعند تطبيق ضاغط أصغر من قيمة ضغط الانتفاخ لعينة مماثلة من حيث الرطوبة البدائية والوزن الحجمي الرطب ونسبة الفراغات ودرجة الإشباع، وبالتالي يمكن افتراض أن قيمة عامل النفاذية من أجل ضاغط أصغر من ضغط الانتفاخ هي قيمة ثابتة تساوي قيمة عامل النفاذية عند أول قيمة للإجهاد المطبق تكون أكبر من قيمة ضغط الانتفاخ للعينة المماثلة.

وتبين الأشكال (5-7)، (5-8)، (5-9) نتائج تجارب التطويق للترب المدروسة ومن أجل العينات الثلاثة ومقارنتها مع العينات المماثلة التي أجريت عليها تجارب الانتفاخ.

5- 2 - 2 - تقييم نتائج الدراسة الحقلية كتطبيق عملي لتجارب تطويق الانتفاخ:

إن تطويق انتفاخ التربة شاقولياً محقق عملياً في النواة الغضارية للسد الترابي أو الركامي عندما يكون إجهاد الوزن الذاتي المؤثر في منتصف النواة أكبر أو يساوي قيمة ضغط انتفاخ تربة النواة الغضارية.

وبناءً عليه وجدنا أن قيمة التسرب عبر جسم السد الترابي في حال اعتماد تجارب التطويق لإيجاد قيمة عامل نفاذية تربة النواة أصغر من قيمة التسرب في حال اعتماد قيمة النفاذية الناتجة عن تجارب الانتفاخ لتربة النواة المدروسة. مما يعني تناقص مقدار الماء المتسرب عبر جسم السد وبالتالي تقليل الحاجة إلى زيادة أبعاد النواة الغضارية لتقليل التسرب وتنظيمه وهذا بدوره يسهم في تخفيض الكلفة الاقتصادية لدراسة وتصميم وإنشاء السد الترابي وملحقاته، خاصة وأن إنشاء مواشير الصرف والمصارف المائية الملحقة بالسد يهدف بشكل أساسي إلى تنظيم التسرب وحماية تربة النواة من الانجراف والتآكل أي أنها تشكل عامل أمان يسهم في زيادة استقرار وتوازن السد.

!!

!!

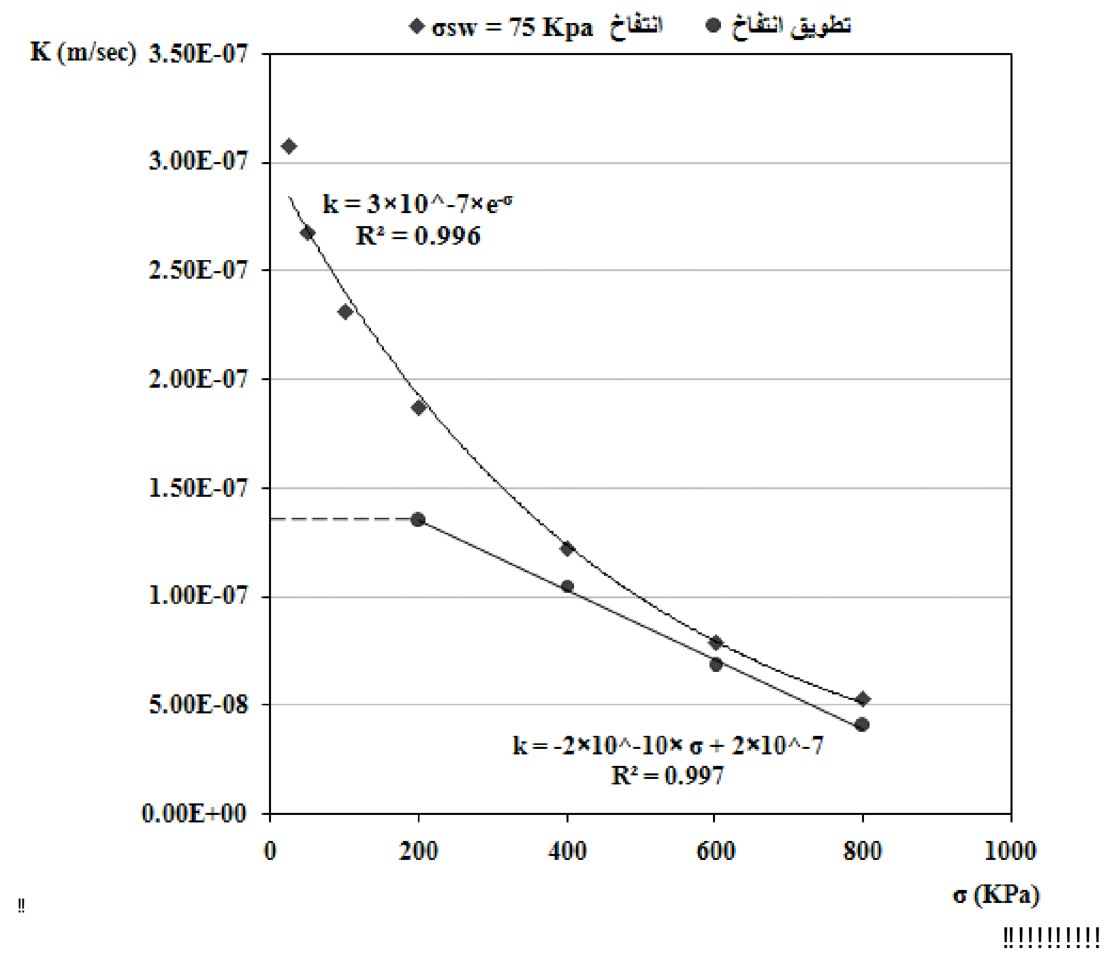
!!

!!

!!

!!



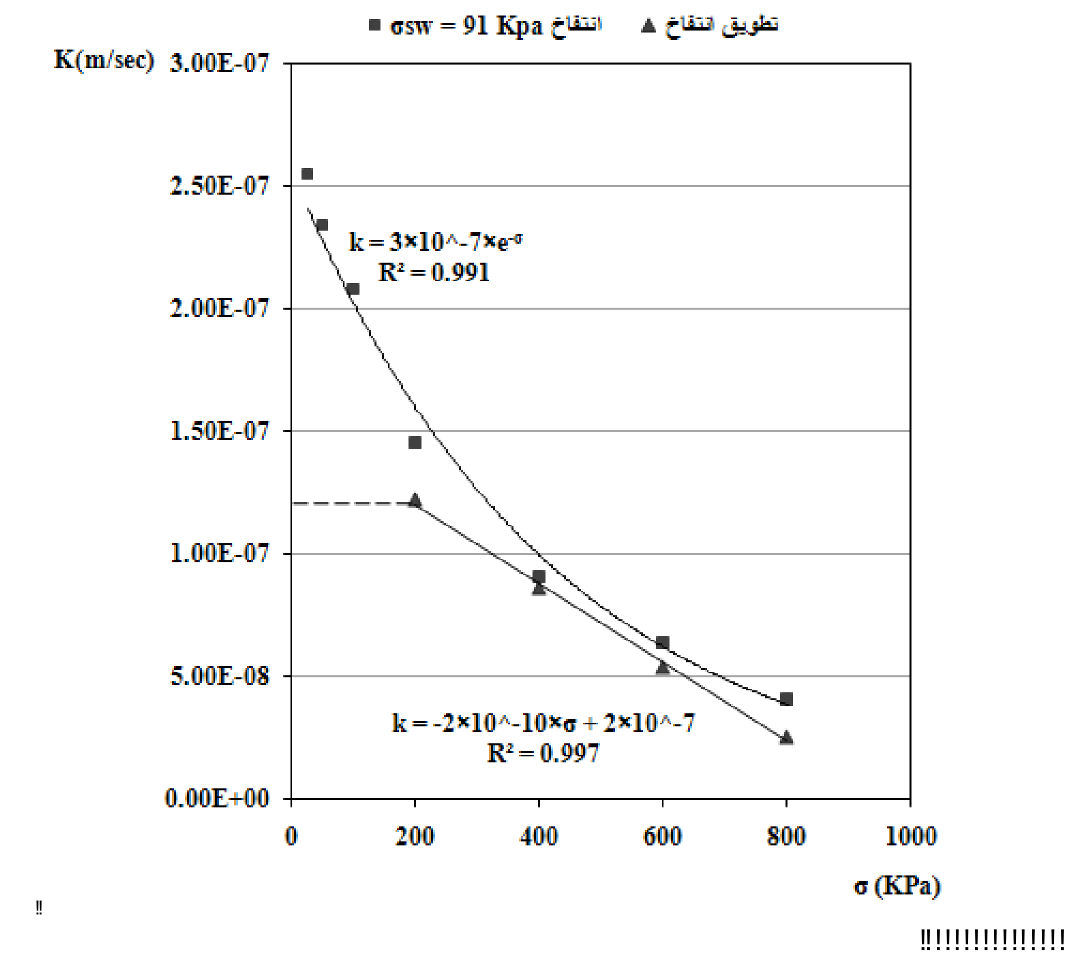


!!!!!!!!!!

!!ž ƒ! ! !!Œ! œ̌!!! Œ !!œ̌! !!ž !! ! !Œ !! !œ!Œ!! !Œ! ƒœ̌!!Œ¼œ!! ƒ!!!! !!Œ 7! 5!!¾! !Œ

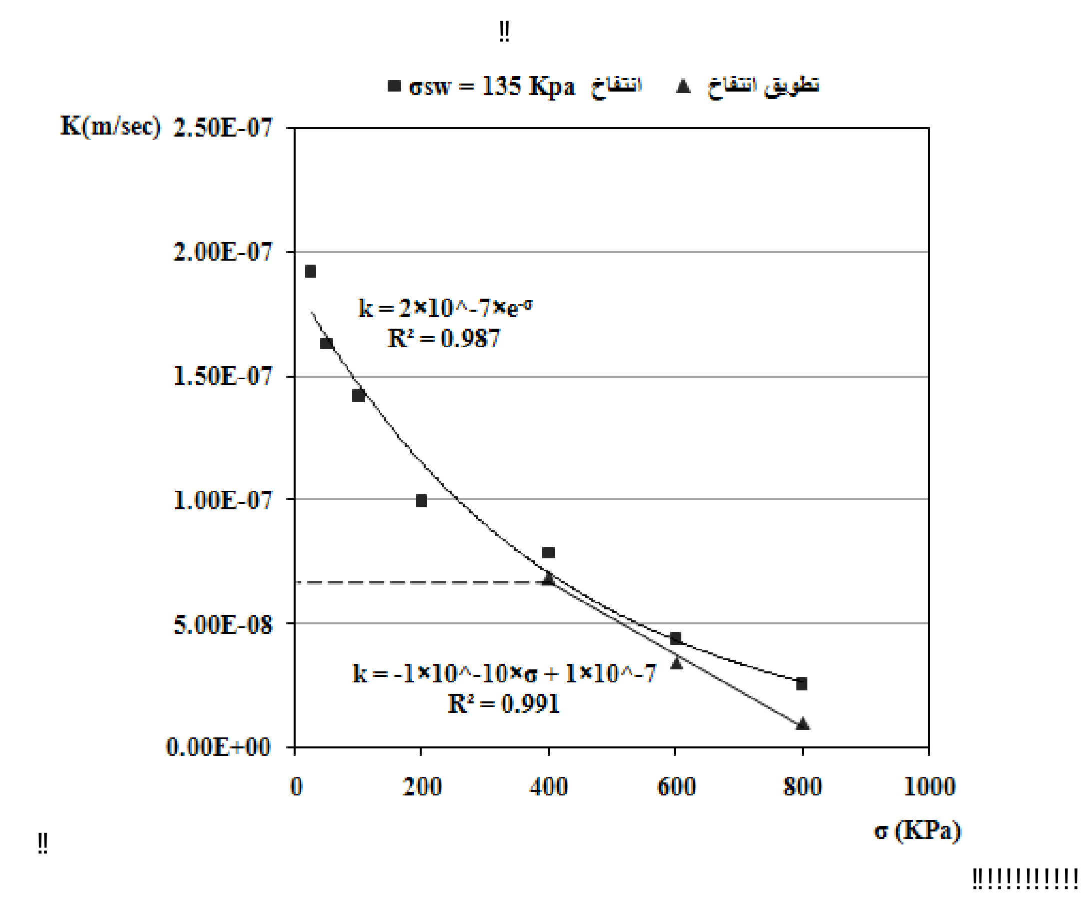
! œ̌!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ(W = 23.7 %)!! !! ! Œ!ƒ!Œ





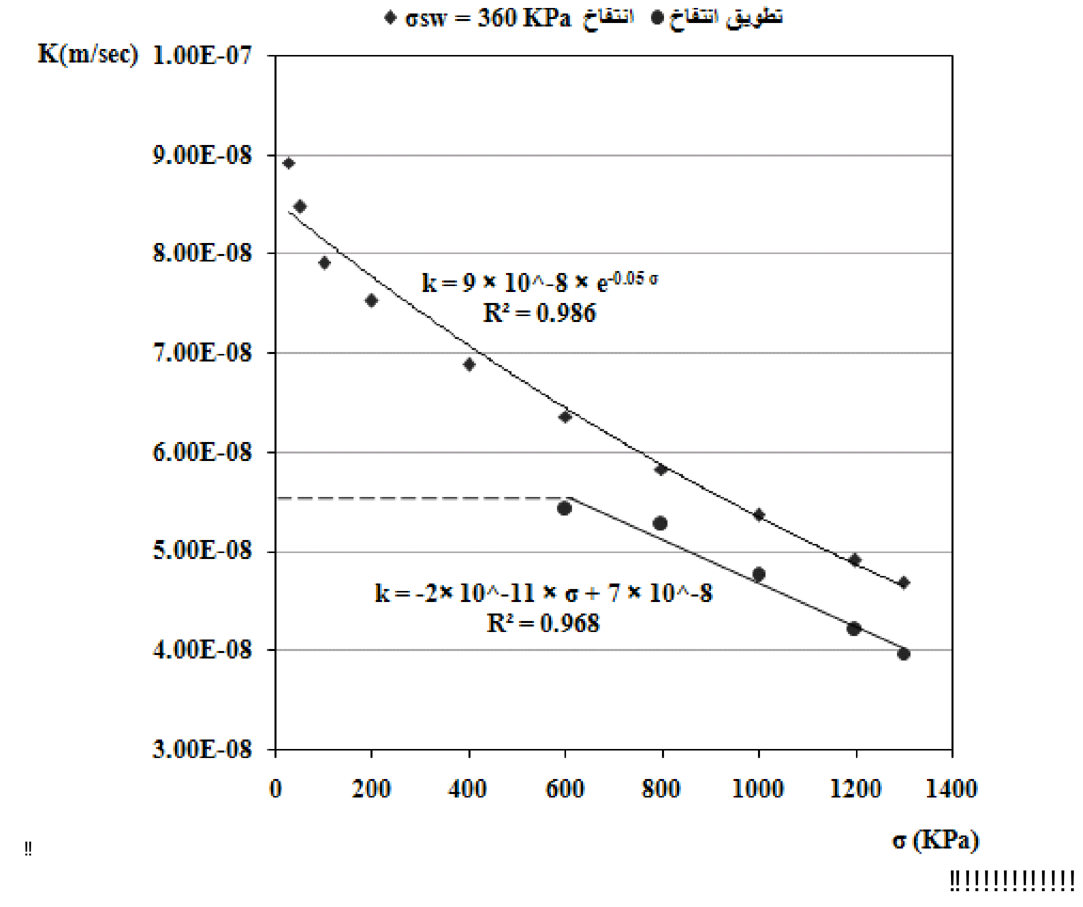
!!ž ƒ! ! !!Œ! č!!! Œ!!š! !!ž !! ! !Œ!! !œ!Œ!! !Œ! ƒ!č!!Œ¼œ!! ƒ!!!! !!Œ! 7! 5!!¾! !Œ

!!! č!!! ŒŽƒ!! !Œ!! !!Œ(W = 20.4 %)!! ƒ!œŒ! ƒ!!Œ


σsw = 135 Kpa انتفاخ
تطويق انتفاخ
K(m/sec)
2.50E-07
2.00E-07
1.50E-07
1.00E-07
5.00E-08
0.00E+00
k = 2×10^-7×e^-σ
R² = 0.987
k = -1×10^-10×σ + 1×10^-7
R² = 0.991
0
200
400
600
800
1000
σ (KPa)

(W = 17.8 %)

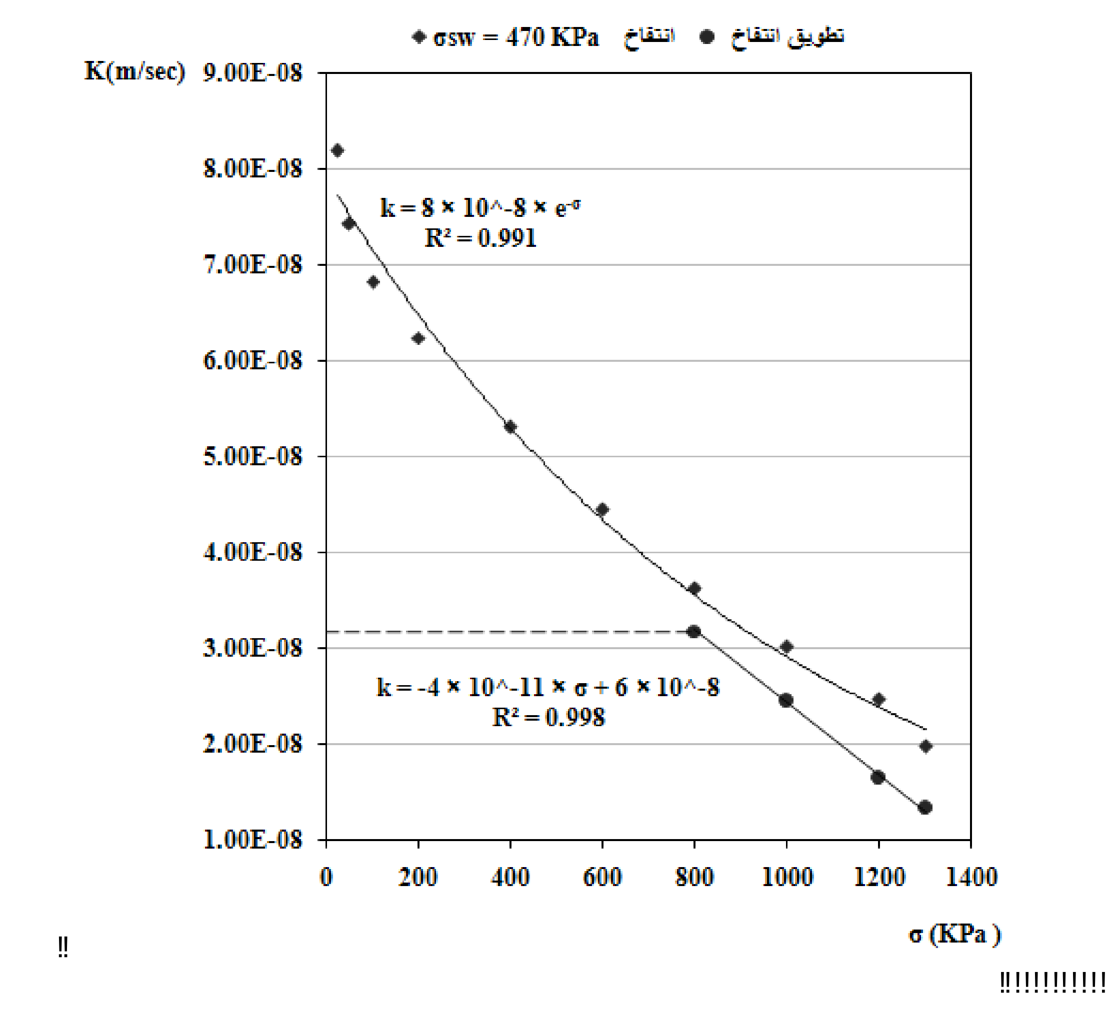

created with
nitro PDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional



‼ž ƒ! ! !!Œ! ǆ!!! Œ !!ǆ! !!ž !! ! !Œ !! !œ!Œ !! !Œ! ƒ!ǆ!!Œ¼œ!! ƒ!!!!! !!Œ 8! 5!!¾! !Œ

!!! ǆ!!! Œ! ! ! !! !Œ!! !!Œ (W = 25.4 %)!! !! ! Œ! ƒ! !Œ



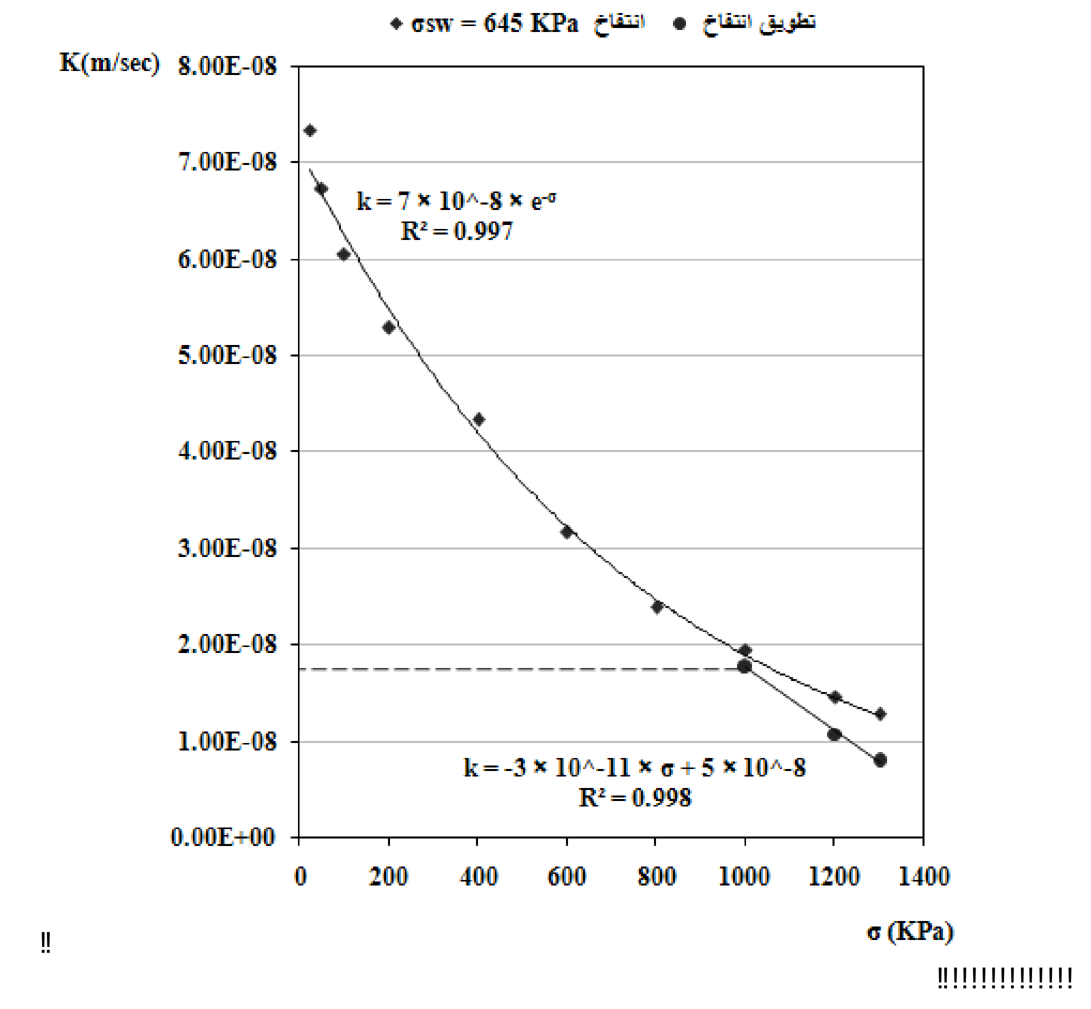


‼

‼!!!!!!!!!!

‼ž ƒ!!‼Œ! œ̌!‼ Œ!‼œ̌! ‼ž ‼!‼Œ‼!œ!Œ‼ !Œ! ƒ!œ̌!‼Œ¼œ!! ƒ!!‼! ‼Œ 8! 5!!¾! !Œ!!!!!!!

‼! œ̌!‼ Œ! ! !‼!Œ!‼‼Œ (W = 22.3 %)‼ ƒœŒ! ƒ!Œ!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!



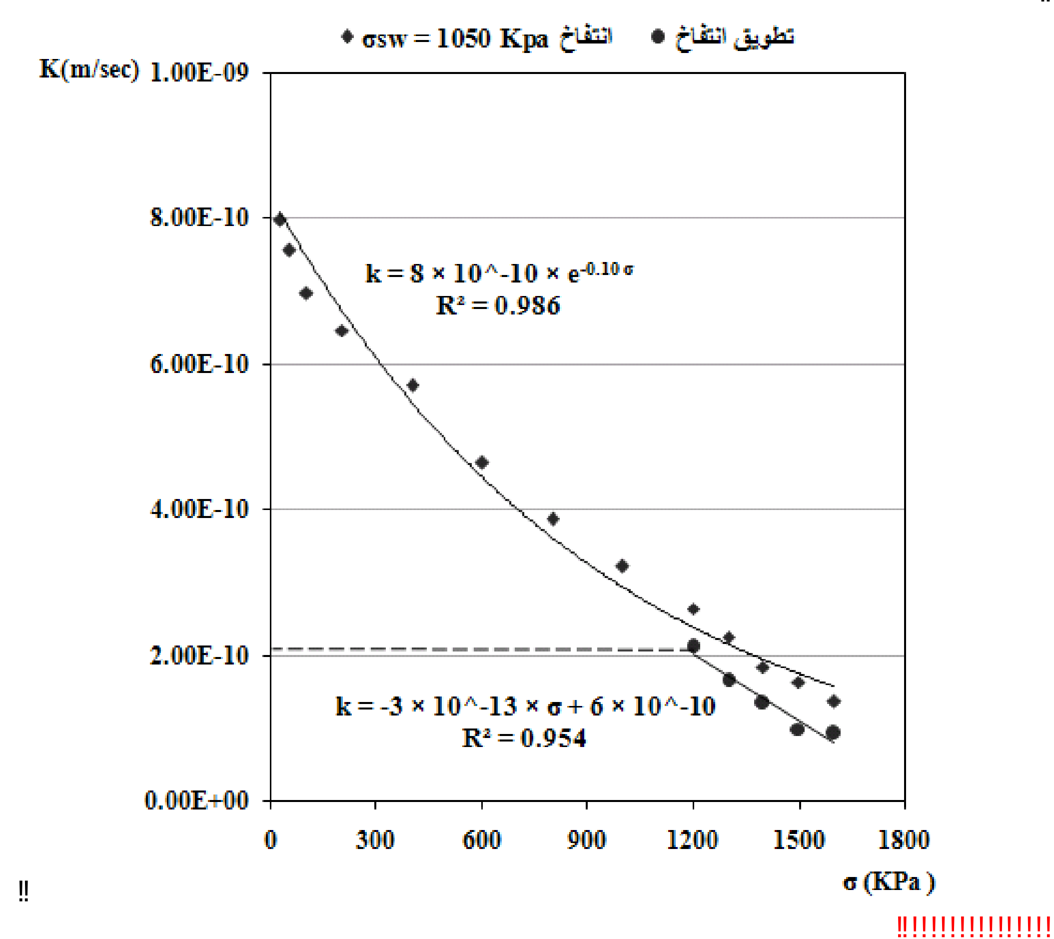
!!

!!!!!!!!!!!!!!

!!ž ƒ! ! !!Œ! œ̌!!! Œ !!œ̌! !!ž !! ! !Œ !! !œ!Œ!! !Œ! ƒ!œ̌!!Œ¼œƒ!!!! !!Œ 3! 8! 5!!¾! !Œ

!!! œ̌!!! Œ! ! ! !! !Œ!! !!Œ (W = 19.08 %)!!! !œŒ! ƒ! !Œ





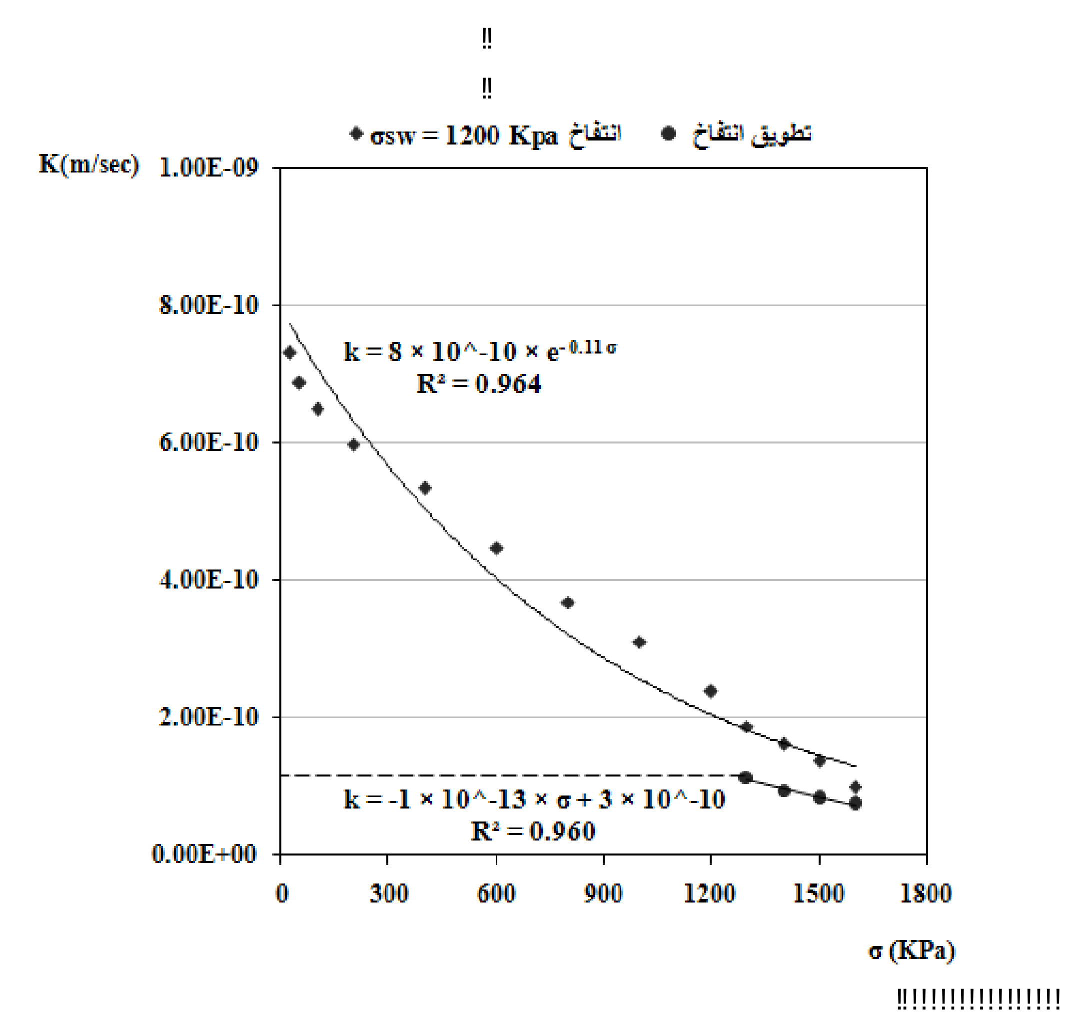
!!!!!!!!!!!!!!!!

!!ž ƒ! ! !!Œ! ǽ!!! Œ !!œ! !!ž !! ! !Œ !! !œ!Œ!! !Œ! ƒ!ǽ!!Œ¼œ!! ƒ!!!! !!Œ 9! 5!!¾! !Œ
!!! ǽ!!! Œƒ!œŒ!! !!Œ (W = 27.9 %)!! !! ! Œ! ƒ! !Œ



!!

!!

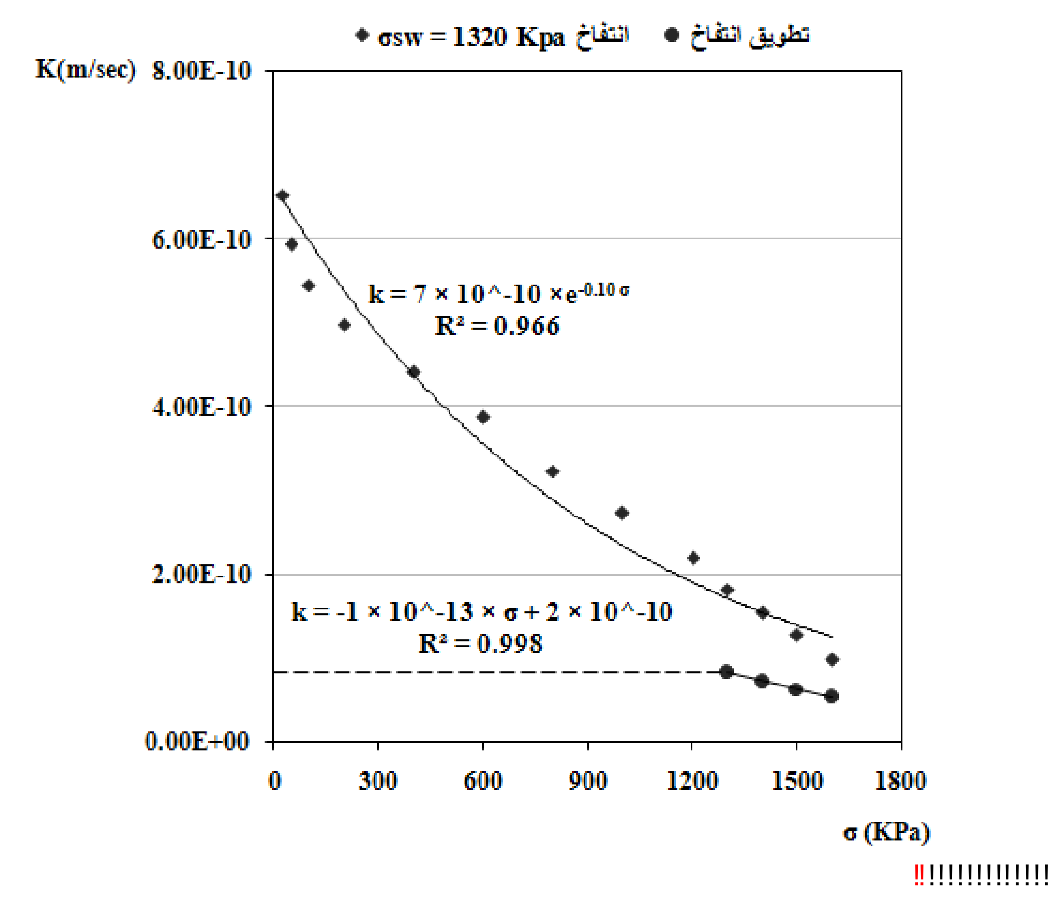


!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!ž ƒ! ! !!Œ! œ̌!!! Œ!!œ̌! !!ž !! ! !Œ!! !œ!Œ!! !Œ! ƒ!œ̌!!Œ¾œ!! ƒ!!!! !!Œ! 9! 5!!¾! !Œ

! œ̌!!! Œƒ!œŒ!! !!Œ (W = 24.1 %)!! ƒ!œŒ! ƒ! !Œ





!!!!!!!!!!!!!!

!!ž ƒ! ! !!Œ! œ̌!!! Œ!!œ̌! !!ž !! ! !Œ!! !œ!Œ!! !Œ! ƒ!œ̌!!Œ¾œ!! ƒ!!! !! !!Œ 9! 5!!¾! !Œ

! œ̌!!! Œƒ!œŒ!! !!Œ (W = 20.6 %)!! !!œŒ! ƒ! !Œ

!!

!!

!!

!!

!!

!!

!!

!!

5- 3- نتائج وتوصيات البحث:

أجريت التجارب المخبرية في البحث على عينات سليمة من ترب غضارية محلية متفاوتة في قابليتها للانتفاخ بهدف دراسة تأثير عوامل انتفاخ التربة المختلفة على نفاذيتها، ومن خلال تحليل نتائج التجارب المخبرية وتقييم النتائج الحقلية التي حصلنا عليها من تحليل ودراسة سد ترابي موجود في القطر وجدنا ما يلي:

1. يمكن اختصار العوامل المؤثرة على السلوك الانتفاخي للتربة الغضارية بضغط الانتفاخ فقط وذلك عند إجراء تجارب النفاذية على عينات سليمة وبالمنهجية ذاتها التي تم اتباعها في بحثنا.

2. إن قيمة عامل النفاذية للترب الثلاث المدروسة تتناقص مع انخفاض الرطوبات البدائية للعينات المختبرة وتحت تأثير إجهادات متساوية وتكون نسبة الانخفاض كما يلي:

- تربة مشروع مطار حماة: يتناقص عامل النفاذية بمقدار **(% 27)** تقريباً.
- تربة تارين: يتناقص عامل النفاذية بمقدار **(% 22)** تقريباً.
- تربة محيط قرية زيزون: يتناقص عامل النفاذية بمقدار **(% 12)** تقريباً.

أي يتناقص عامل النفاذية بمعدل صغير نسبياً وهذا بدوره يعني أن تأثير الرطوبة البدائية للتربة الانتفاخية على عامل نفاذيتها محدود.

3. مع انخفاض الرطوبة البدائية يزداد ضغط انتفاخ العينة المدروسة ويقابل هذه الزيادة في ضغط الانتفاخ انخفاض قيم عامل النفاذية بالمقادير المذكورة في الفقرة **(2)**، أي يتناقص عامل النفاذية بمعدل صغير نسبياً وهذا بدوره يعني أن تأثير ضغط انتفاخ التربة على عامل نفاذيتها محدود، مما يتناقض مع بعض المراجع التي بينت أن النفاذية تنخفض بشكل كبير مع زيادة انتفاخ التربة [20]، [36]، [43]، [44].

4. إن ازدياد الضغط الشاقولي المطبق على العينة يسبب انخفاض نسبة الفراغات مما يؤدي إلى تناقص نفاذية التربة المدروسة، حيث أنه مع ازدياد الضغط المطبق بمقدار **(% 1)** تتناقص قيمة عامل النفاذية وفق ما يلي:

- تربة مشروع مطار حماة: يتناقص عامل النفاذية بمقدار **(% 20)** تقريباً.
- تربة تارين: يتناقص عامل النفاذية بمقدار **(% 15)** تقريباً.
- تربة محيط قرية زيزون: يتناقص عامل النفاذية بمقدار **(% 13)** تقريباً.

5. إن قيم عامل النفاذية للتربة في تجارب الآدومتر العادي (غير المطوق) أكبر من قيم عامل النفاذية الناتجة عن تطويق الانتفاخ الشاقولي لعينات مماثلة من نفس التربة المدروسة ولها نفس الشروط البدائية $(S_r , e , \gamma_d , w_n)$ وتخضع لتأثير نفس الإجهاد الشاقولي المطبق، حيث أن مقدار انخفاض عامل النفاذية بين حالتي السماح بالانتفاخ وتطويقه يكون وفق ما يلي:

- تربة مشروع مطار حماة: ينخفض عامل النفاذية في حالة التطويق بمقدار **(% 15)** تقريباً.
- تربة تارين: ينخفض عامل النفاذية في حالة التطويق بمقدار **(% 28)** تقريباً.
- تربة محيط قرية زيزون: ينخفض عامل النفاذية في حالة التطويق بمقدار **(% 45)** تقريباً.

6. لم يحدث تشوه (انضغاط) في عينات التربة المختبرة في حالة تطويق الانتفاخ الشاقولي قبل أن يتم تطبيق ضغط شاقولي أكبر من ضغط الانتفاخ الذي تم تطويقه.



7. في تجارب تطويق الانتفاخ الشاقولي للترب المدروسة لم نتمكن من قياس عامل النفاذية بطريقة التشديد عند تطبيق ضاغط أصغر من ضغط انتفاخ العينة الذي تم تطويقه، كما أننا لم نتمكن مخبرياً من قياسه بطريقة أخرى، وبما أن معدل تغير قيمة عامل النفاذية صغير كما وجدنا من التجارب المخبرية فإنه يمكن اعتبار قيمته في هذه الحالة مساوية لقيمة ثابتة هي قيمة عامل النفاذية عند بدء تشوه (انضغاط) التربة.

8. تم تمثيل العلاقة بين عامل النفاذية **(m/sec)** وضغط الانتفاخ **(KPa)** بمنحنيات تجريبية واستنتاج علاقات رياضية من هذه المنحنيات تربط قيمة عامل النفاذية بقيمة ضغط انتفاخ التربة المدروسة:

- تربة مشروع مطار حماة: $k = -1,14 \times 10^{-9} . \sigma_{sw} + 2,45 \times 10^{-7}$, $R^2 = 0.962$
- تربة قرية تارين: $k = -8,4 \times 10^{-11} . \sigma_{sw} + 9,6 \times 10^{-8}$, $R^2 = 0.918$
- تربة محيط قرية زيزون: $k = -3,23 \times 10^{-13} . \sigma_{sw} + 6,62 \times 10^{-10}$, $R^2 = 0.923$

9. يمكن الاستفادة من نتائج البحث عند دراسة التسرب في السدود الترابية أو الركامية الحاوية على عنصر مضاد للرشح، حيث يتم استخدام طريقة تطويق الانتفاخ الشاقولي لتربة النواة الغضارية من أجل تحديد قيمة عامل النفاذية عند منتصف النواة K_C في حال كان ارتفاع النواة الغضارية **h** يحقق العلاقة: $h \geq 2.\frac{\sigma_{sw}}{\gamma_{sat}}$ ، وفي حال العكس يتم حساب عامل النفاذية من تجارب الآدومتر العادي (غير المطوق)، وقد تبين لنا مدى التوافق الكبير في قيم التسرب المحسوبة بالاعتماد على نتائج تجارب التطويق الشاقولي للانتفاخ مع القيم الحقلية التقديرية للتسرب عبر جسم السد المدروس.

الشكل: حساب عامل النفاذية عند منتصف الشريحة الوسطية في النواة الغضارية

10. إن انخفاض نفاذية تربة النواة الغضارية يؤدي إلى تخفيض مقدار التيار الراشح (المتسرب) عبر جسم السد الترابي إلا أنه لا ينصح باستخدام تربة عالية الانتفاخ في العنصر المضاد للرشح بالرغم من نفاذيتها القليلة بسبب التأثيرات السلبية للانتفاخ على استقرار وتوازن النواة الغضارية.

11. يجب إجراء دراسة متأنية لتربة النواة الغضارية بحيث يتم اختيار التربة التي تحقق الريعية الاقتصادية إضافةً إلى استقرار وتوازن السد ويتم تحديد نفاذيتها تبعاً لارتفاع السد المدروس وقابلية التربة للانتفاخ.

!! ! !! !!!! !! ! !! ! !!!

(حسب الترتيب الأبجدي لكنية المؤلف)

References!!

أولاً: المراجع العربية:

!1 ابراهيم، د. بسام وحديد، د. شعبان **(1997)** - المنشآت المائية **(1)** - كلية الهندسة المدنية - منشورات جامعة البعث.

!2 ابراهيم، د. بسام وحديد، د. شعبان **(2004)** - المنشآت المائية **(2)** السدود - كلية الهندسة المدنية - منشورات جامعة البعث.

!3 العبد الله، د. علي **(1990)** - التنبؤ بنهوض قواعد أساسات الأبنية والمنشآت المبنية على تربة غضارية منتفخة مع الزمن - أطروحة دكتوراه - إشراف البروفسور أ. مصطفايف - باكو - أذربيجان.

!4 العبد الله، د. علي **(1998)** - دراسة خصائص التربة الغضارية المنتفخة - مجلة جامعة البعث - المجلد **(20)** - العدد **(4)**.

!5 الفراج، د. عبد الله **(2009)** - أسس علوم التربة - المحاضرة الأولى - ماء التربة - مقرر طلاب كلية الهندسة المدنية - جامعة الملك سعود - المملكة العربية السعودية.

!6 القصبي، د. السيد عبد الفتاح **(1999)** - ميكانيك التربة - كلية الهندسة المدنية - جامعة القاهرة - جمهورية مصر العربية.

!7 المغربي، د. سالم العزب **(2008)** - كيمياء بيئة التربة، الدروس العملية - قسم علوم التربة - كلية علوم الأغذية والزراعة - جامعة الملك سعود - المملكة العربية السعودية.

!8 الدليم، م. باسل **(2003)** - دراسة سلوك التربة الغضارية في جنوب سوريا - رسالة ماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

!9 المهيدب، عبد الله بن ابراهيم **(2002)** - خواص التربة القابلة للانتفاخ في المملكة العربية السعودية - كلية الهندسة المدنية - الرياض - جامعة الملك سعود.

!10 تقلا، د. محمد **(2000)** - ميكانيك التربة **(1)** - كلية الهندسة المدنية - منشورات جامعة البعث.

!11 حجاوي، سامي أحمد **(2003)** - فحوصات التربة للأغراض الإنشائية - جامعة نابلس - فلسطين المحتلة.

!12 حمامي، م. محمد لؤي **(2002)** - دراسة تأثير المواد الغضارية ونوعيتها على السلوك الانتفاخي للتربة في سوريا - رسالة ماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب.

!13 سراج الدين، د. خلدون **(1998)** - ميكانيك التربة **(2)** - كلية الهندسة المدنية - منشورات جامعة حلب.

!14 فاخوري، د. عامر وكوسى، د. عيسى **(2000)** - هندسة الأساسات السطحية **(1)** - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث.

!15 فاخوري، د. عامر والعبد الله، م. جمال **(2004)** - تأثير انتفاخ التربة على أقنية الري في منطقة الغاب - رسالة ماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث.

!16 كوسى، د. عيسى **(1988)** - دراسة تأثير انتفاخ التربة على الحالة الإجهادية التشوهية للأوتاد الوحيدة الجسيئة والمرنة - أطروحة دكتوراه - إشراف البروفسور أ. مصطفايف - باكو - أذربيجان.

!17 كوسى، د. عيسى ديب **(1997)** - هندسة الأساسات **(3)** - كلية الهندسة المدنية - منشورات جامعة البعث.

!18 كوسى، د. عيسى **(1997)** - تأثير الرطوبة على انتفاخ التربة - مجلة قواعد التأسيس وميكانيك التربة - المجلد **(43)** - العدد **(5)** - موسكو.

!19 كوسى، د. عيسى وعابد، م. أيمن **(2003)** - ضغط انتفاخ التربة على قدرة تحملها - رسالة ماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث.

!20 نصار، د. محمد ويني، د. حنا والعمارين، م. أيمن **(2006)** - دراسة نفاذية التربة الغضارية في المنطقة الجنوبية من سوريا - رسالة ماجستير في الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

!21 هليل، د. محمد تركي **(1996)** - أساسيات فيزياء التربة - كلية العلوم الأساسية - جامعة الملك سعود - المملكة العربية السعودية.

!22 الكود المصري لميكانيك التربة وتنفيذ الأساسات - الجزء الثاني: الاختبارات المعملية **(1993)**.

!23 مديرية الموارد المائية في حمص **(2009)** - دراسات عن الوضع المائي في الجمهورية العربية السورية - ... العربية السورية.

... باسل الأسد في طرطوس **(2010)** - دراسة معدلات التسرب عبر جسم السد - مديرية

الموارد المائية في طرطوس - وزارة الري - الجمهورية العربية السورية.

25! مشروع سد الشهيد باسل الأسد في طرطوس (1998) - لوحات المقاطع التنفيذية في جسم السد والنواة الغضارية - مديرية الموارد المائية في طرطوس - وزارة الري - الجمهورية العربية السورية.

!!!!! ƒ!!! ! Œ! Œ!Œfcde

26. Alkathami, M (2005) - Permeability, Porosity & Skin Factor - TUPREP Research Report Volume J - May - (81 - 105).

27. Ameta, N. K, Purohit, D. G. M, and Wayal, A. S (2007) - Characteristics, Problems and Remedies of Expansive Soils of Rajasthan, India - J. N. V. University, Jodhpur, India.

28. Aysen, A (2002) - Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications - Lisse - Balkema.

29. Aysen, A (2003) - Problem Solving in Soil Mechanics - Lisse - Balkema.

30. Cabalar, A.F (2009) - Dynamic Properties of Various Plasticity Clays - Department of Civil Engineering, University of Gaziantep, Turkey.

31. Chao, J. J (2008) - Discussion on Two Simplified Swelling Pressure Models for Expansive Soils - Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China.

32. Chen, F. H (1988) - Foundations on Expansive Soils - Elsevier, New York.

33. Das, B.M. (1993) - Principles of Geotechnical Engineering - PWS Pub ling, Boston.

34. Das, B.M. (2008) - Advanced Soil Mechanics - Third edition - Taylor & Francis - London and New York.

35. Deutsche, F. S (2007) - Mechanics of Unsaturated Soils - Bauhaus University - Weimar - Germany.

36. Dicarlo, D. A, Parlange, J. Y, Prasad, S. N, Romkens, M. J. M, Steenhuis, T. S, and Wells, R. R (2003) - Infiltration and Surface Geometry Features of A Swelling Soil Following Successive Simulated Rainstorms - Soil Science Society of America - S. Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA.

37. Fredlund, D. G and Rahardjo, H (1993) - Soil Mechanics for Unsaturated Soils - John Wiley & Sons, New York.

38. Fredlund, D. G (1994) - Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil Water Characteristics Curve - University of Saskatchewan, Canada.

39. Kodesova, R (2003) - Determination of Hydraulic Properties of Unsaturated Soil Via Inverse Modeling - Department of Soil Science and Geology - Czech University of Agriculture - Prague - Czech Republic.

40. Little, D. N, and Perty, T. M (2002) - Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils - Journal of Materials in Civil Engineering - Vol.14, No.6, (102-148).

41. Lytton, R. L (1995) - Volume Change and Flow Calculations in Expansive Soils - Texas - United States of America.

42. Proctor, R.R (1993) - The Design and Construction of Rolled - Earth Dams - Engineering News Record II.

43. Sivakugan, N (2005) - Permeability and Seepage - France.

44. Taboada, M. A (2003) - Soil Shrinkage Characteristics in Swelling Soils - Buenos Aires - Argentina.

45. Terzaghi, K (1943) - Theoretical Soil Mechanics - Washington, D.C.

46. Terzaghi, K, Peck, R. B, and Mesri, G (1996) - Soil Mechanics in Engineering Practice - John Wiley & Sons, New York.

47. Zayed, M (2001) - Consolidation of Soil - SIVA - New York.

48. ASTM, D4546-96 (1996) - Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils - United States of America.

49. BS 1377 - Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes - British Standards Institution, London.

